



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής

Ανάπτυξης

Διδακτορική διατριβή

---

## Μοντέλα αστικής εξάπλωσης και παρακολούθηση με τηλεπισκόπηση νυκτερινών φώτων

---

Λιάκος Λεωνίδας

Επιβλέπων καθηγητής: Σταθάκης Δημήτριος

Βόλος, Ιούλιος 2021



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα  
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,  
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση  
Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Το έργο συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση του ανθρώπινου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας» (MIS-5000432), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).

## Τριμελής Επιτροπή

Σταθάκης Δημήτριος: Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τσέλιος Βασίλειος: Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Οικονομικής και Περιφερειακής Ανάπτυξης, Πάντειο Πανεπιστήμιο

Πανταζής Δήμος: Καθηγητής, Σχολή Μηχανικών, Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής



## Abstract

The dissertation aims at monitoring and analyzing the urban activity of greek cities through the exploitation of a particular category of remote sensing data, the night time lights. It is observed that night lights significantly reflect urbanization levels and economic development and are strong correlated with economic variables such as GDP, population, construction activity and consumption electricity.

The dissertation is supported by the main datasets of night lights (DMPS/OLS, snpp-VIIRS, ISS) to capture the greek urban "reality". Nighttime lights datasets are available without having undergone pre-processing steps to remove factors affecting their quality and research results. Significant external factors are influencing data quality, such as lunar radiation. Technical features and limitations, such as the overglow and saturation of DMPS/OLS data, continue to concern the scientific community.

In the framework of the dissertation new methods will be proposed to correct lunar radiation from snpp-VIIRS datasets. An attempt will be made to improve DMPS/OLS data with the support of SAR data. In addition, datasets from the Luojia 1-01 satellite and images from the ISS, through their separate features, can help assessment accuracy of existing and established data (DMPS/OLS, snpp-VIIRS).

The aim of the dissertation is to take advantage of the night light data to record the seasonality of urban areas in Greece, to simulate the urban sprawl that will take place in the future, to predict the intensity of urban activity, to estimate in a detailed spatial and temporal scale economic variables such as GDP. Night time lights will be used to evaluate the consequences of extraordinary conditions in urban activity, to assess burden on light pollution and to describe the commuting patterns in modern greek cities.

The results arising from the dissertation are remarkable. Innovative methods improve data and analysis, prediction and interpretation of urban phenomena. The use of night lights is an important tool in the hands of the researcher but it requires deep awareness of technical limitations and of exogenous factors affecting their capabilities.

**Keywords:** commuting patterns, dark object subtraction, lunar radiation, median shift, night time lights, overglow, photopollution, prediction, saturation, sleuth, urban sprawl

## Περίληψη

Η διατριβή στοχεύει στην παρακολούθηση και ανάλυση της λειτουργίας των ελληνικών αστικών περιοχών μέσω της εκμετάλλευσης μιας ιδιαίτερης κατηγορίας δεδομένων τηλεπισκόπησης, των νυκτερινών φώτων. Τα νυκτερινά φώτα έχει παρατηρηθεί ότι αντικατοπτρίζουν σε σημαντικό βαθμό τα επίπεδα αστικής και οικονομικής ανάπτυξης και είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με οικονομικά μεγέθη όπως το ΑΕΠ, ο πληθυσμός, η οικοδομική δραστηριότητα και η κατανάλωση του ηλεκτρικού ρεύματος.

Η διεξαγωγή της διατριβής υποστηρίζεται από τα κυριότερα σύνολα δεδομένων νυκτερινών φώτων (DMPS/OLS, snpp-VIIRS, ISS) για την αποτύπωση της ελληνικής αστικής «πραγματικότητας». Τα δεδομένα νυκτερινών φώτων διατίθενται χωρίς να έχουν υποστεί την απαραίτητη προεπεξεργασία για την αφαίρεση παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητά τους και τα αποτελέσματα της έρευνας. Σημαντικοί εξωγενείς παράγοντες επιρροής της ποιότητας των δεδομένων, όπως η σεληνιακή ακτινοβολία, δεν έχουν αφαιρεθεί. Τεχνικά χαρακτηριστικά και περιορισμοί όπως η υπερλάμψη και ο κορεσμός των δεδομένων DSMP/OLS συνεχίζουν να απασχολούν την επιστημονική κοινότητα.

Στα πλαίσια της διατριβής προτείνονται μέθοδοι για την διόρθωση της σεληνιακής ακτινοβολίας από τα δεδομένα snpp-VIIRS και επιχειρείται η βελτίωση των δεδομένων DMSP/OLS με την συνδρομή δεδομένων SAR.

Στόχος της διατριβής είναι να εκμεταλλευτεί τα δεδομένα νυκτερινών φώτων για να καταγράψει την εποχικότητα των αστικών περιοχών στον Ελλαδικό χώρο, να προσομοιώσει την αστική διάχυση που θα λάβει χώρα στο μέλλον, να προβλέψει την ένταση της αστικής δραστηριότητας, να εκτιμήσει σε λεπτομερή χωρική και χρονική κλίμακα οικονομικές μεταβλητές όπως το ΑΕΠ. Τα νυκτερινά φώτα χρησιμοποιούνται για να αποτιμηθούν οι συνέπειες έκτακτων συνθηκών στην αστική δραστηριότητα, για να εκτιμηθεί η επιβάρυνση από την φωτορύπανση και για να περιγραφούν τα πρότυπα μετακίνησης στις σύγχρονες ελληνικές πόλεις.

Από τα αποτελέσματα προκύπτουν αξιόλογες και καινοτόμες μέθοδοι για την βελτίωση των δεδομένων και την ανάλυση, πρόβλεψη και ερμηνεία των αστικών φαινομένων. Η χρήση νυκτερινών φώτων αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο στα χέρια του ερευνητή αλλά απαιτεί βαθειά επίγνωση των τεχνικών περιορισμών και των εξωγενών παράγοντων που επηρεάζουν τις δυνατότητές τους.

**Λέξεις κλειδιά:** πρότυπα μετακίνησης, μέθοδος dark object subtraction, σεληνιακή ακτινοβολία, μέθοδος median shift, νυκτερινά φώτα, υπερλάμψη, κορεσμός, φωτορύπανση, πρόβλεψη, μοντέλο sleuth, αστική εξάπλωση

# Πίνακας περιεχομένων

## Κατάλογος πινάκων

## Κατάλογος εικόνων

## Κατάλογος διαγραμμάτων

## Κατάλογος χαρτών

## Ακρωνύμια

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Υποθέσεις εργασίας . . . . .	3
1.2	Βιβλιογραφική επισκόπηση . . . . .	5
1.3	Στόχοι-Καινοτομία . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Δεδομένα - Περιοχές Μελέτης</b>	<b>25</b>
2.1	Δορυφορικά δεδομένα νυχτερινών φώτων . . . . .	26
2.1.1	Πηγές φωτός . . . . .	26
2.1.2	Defense Meteorological Satellite Program Operational Line Scanner (DMSP/OLS) . . . . .	27
2.1.3	Visible Infrared Imaging Radiometer (VIIRS) Suite . . . . .	28
2.1.3.1	Τα δεδομένα VIIRS DNB Cloud-Free Composites . . . . .	35
2.1.3.2	Τα δεδομένα Black Marble . . . . .	37
2.1.4	LuoJia1-01 . . . . .	39
2.1.5	Διεθνής Διαστημικός Σταθμός . . . . .	40
2.1.6	Άλλες πηγές δεδομένων . . . . .	45
2.1.7	Παράγοντες που επηρεάζουν την χρησιμότητα των δεδομένων νυχτερινών φώτων . . . . .	50
2.2	Τα δεδομένα της διατριβής . . . . .	54
2.3	Περιοχές Μελέτης . . . . .	69
<b>3</b>	<b>Μεθοδολογία</b>	<b>85</b>
3.1	Βελτιστοποίηση των δεδομένων DMSP/OLS . . . . .	86

3.2	Προεπεξεργασία καθημερινών δεδομένων VIIRS . . . . .	92
3.2.1	Διόρθωση της σεληνιακής ακτινοβολίας . . . . .	92
3.2.1.1	Διόρθωση με το μοντέλο Miller και με δεδομένα BRDF . . . . .	93
3.2.1.2	Η μέθοδος Dark Object Subtraction . . . . .	94
3.2.2	Η μέθοδος Median Shift . . . . .	97
3.3	Νυχτερινά φώτα και αστικά φαινόμενα . . . . .	101
3.3.1	Πρόβλεψη της αστικοποίησης με δεδομένα DMSP/OLS . . . . .	101
3.3.2	Προσομοίωση αστικής διάχυσης με την μέθοδο SLEUTH . . . . .	101
3.3.3	Δείκτης φωτορύπανσης με νυχτερινά φώτα . . . . .	106
3.3.4	Εποχικότητα, εκτίμηση ΑΕΠ με δεδομένα νυχτερινών φώτων . . . . .	107
3.3.5	Χωρικά και χρονικά πρότυπα κατανομής της αστικής δραστηριότητας . . . . .	115
3.3.6	Έκτακτες συνθήκες και νυχτερινά φώτα . . . . .	117
3.3.7	Δορυφορικές εικόνες ISS στην Αθήνα . . . . .	119
<b>4</b>	<b>Αποτελέσματα</b>	<b>120</b>
4.1	Βελτιστοποίηση των δεδομένων DMSP/OLS . . . . .	120
4.2	Προεπεξεργασία καθημερινών δεδομένων VIIRS . . . . .	126
4.2.1	Διόρθωση της σεληνιακής ακτινοβολίας . . . . .	126
4.2.2	Η μέθοδος Median Shift . . . . .	130
4.3	Νυχτερινά φώτα και αστικά φαινόμενα . . . . .	137
4.3.1	Πρόβλεψη της αστικοποίησης με δεδομένα DMSP/OLS . . . . .	137
4.3.2	Προσομοίωση αστικής διάχυσης με την μέθοδο SLEUTH . . . . .	143
4.3.2.1	Αδυναμίες του μοντέλου SLEUTH και των δεδομένων εισόδου . . . . .	149
4.3.3	Δείκτης φωτορύπανσης με νυχτερινά φώτα . . . . .	150
4.3.4	Εποχικότητα, εκτίμηση ΑΕΠ με δεδομένα νυχτερινών φώτων . . . . .	153
4.3.5	Χωρικά και χρονικά πρότυπα κατανομής της αστικής δραστηριότητας . . . . .	162
4.3.6	Έκτακτες συνθήκες και νυχτερινά φώτα . . . . .	172
4.3.7	Δορυφορικές εικόνες ISS στην Αθήνα . . . . .	180
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>185</b>

5.1	Επίλογος . . . . .	195
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>197</b>

## Κατάλογος πινάκων

1	Τα 22 κανάλια του αισθητήρα snpp-VIIRS . . . . .	31
2	Σύγκριση των χαρακτηριστικών των δεδομένων DMSP/OLS και snpp-VIIRS . . . . .	39
3	Χαρακτηριστικά της κάμερας λήψης και εικόνας ISS . . . . .	43
4	Τα βασικά χαρακτηριστικά των κυριότερων πηγών δεδομένων νυχτερινών φωτών . . . . .	49
5	Συντελεστές εξίσωσης β' βαθμού για την διαβαθμονόμηση των δεδομένων DMSP/OLS . . . . .	63
6	Συντελεστής συσχέτισης Pearson των συντελεστών διόρθωσης . . . . .	64
7	Οι περιοχές μελέτης που χρησιμοποιήθηκαν στην βελτίωση των δεδομένων DMSP/OLS και τα χαρακτηριστικά τους . . . . .	70
8	Περιοχές μελέτης στον Ελλαδικό χώρο . . . . .	77
9	Οι περιοχές ενδιαφέροντος στην μέθοδο βελτίωσης των δεδομένων νυχτερινών φωτών DMSP/OLS και τα χαρακτηριστικά τους SoV και nSoL . . . . .	90
10	Κρούσματα και θάνατοι από τον COVID-19 ανά μήνα του 2020 . . . . .	119
11	Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson της μεθόδου βελτίωσης των δεδομένων DMSP/OLS με τα δεδομένα snpp-VIIRS και τα DMSP/OLS διαβαθμονομημένης ακτινοβολίας . . . . .	121
12	Η μέση διαφορά του μέσου όρου των τιμών ακτινοβολίας μιας ημέρας με την επόμενη για τις περιοχές εφαρμογής της μεθόδου Median Shift . . . . .	135
13	Το τυπικό σφάλμα των υπολειμμάτων (Residual Standard Error) για τις περιοχές εφαρμογής της μεθόδου Median Shift . . . . .	135
14	Πρόβλεψη με το μοντέλο SLEUTH του ποσοστού αστικής έκτασης της κάθε περιφέρειας επί της συνολικής αστικής έκτασης της Ελλάδας . . . . .	148
15	Η διακύμανση του δείκτη φωτορύπανσης (SoP) στην Σαντορίνη το 2017 με δεδομένα VIIRS . . . . .	150

## Κατάλογος εικόνων

1	Έμμεση φωτορύπανση στην Αττική (καλοκαίρι 2000) . . . . .	18
2	Τα φώτα DMSP/OLS και το πρόβλημα του κορεσμού στη πόλη Ho Chi Minh . . . . .	32
3	Αθήνα, εικόνες από ISS, LJ1-01, snpp-VIIRS, DMSP/OLS . . . . .	42
4	Αθήνα, χαρακτηριστική δορυφορική εικόνα ISS . . . . .	43
5	Η πόλη του Brisbane στην Αυστραλία όπως φαίνεται από αεροφωτογραφίες και από εικόνα EROS-B . . . . .	46
6	Δορυφορικές εικόνες DMSP/OLS 2013 για την Μύκονο και Σαντορίνη .	60
7	Δορυφορικές εικόνες snpp-VIIRS 2017 για την Σαντορίνη . . . . .	60
8	Διορθωμένη εικόνα Stable Lights (v4) DMSP/OLS με τους συντελεστές μετατροπής του Elvidge . . . . .	62
9	Τα νυχτερινά φώτα DMSP/OLS για το Μιλάνο (έτος 2013), τρισδιάστατη οπτικοποίηση των τιμών DN . . . . .	87
10	Η μεταβολή της σεληνιακής φωτεινότητας στις 01:00 πμ το 2018 . . . . .	98
11	Συμπεριφορικοί κανόνες του μοντέλου SLEUTH κατά τον κύκλο ανάπτυξης. . . . .	104
12	Το Μιλάνο σε τρισδιάστατη απεικόνιση στις διαφορετικές πηγές δεδομένων νυχτερινών φώτων, ραντάρ, δείκτη βλάστησης και θερμοκρασίας εδάφους . . . . .	122
13	Τα αποτελέσματα της διόρθωσης των δεδομένων DMSP/OLS και των δεδομένων αναφοράς σε τρισδιάστατη απεικόνιση . . . . .	125
14	Σύγκριση δύο μεθόδων εκτίμησης φωτορύπανσης, Chalkias et al. 2006 και PPI, στις νήσους Μύκονος και Σαντορίνη . . . . .	151
15	Ετήσια διακύμανση του δείκτη φωτορύπανσης (PPI) στην Σαντορίνη . .	152

## Κατάλογος διαγραμμάτων

1	VIIRS DNB relative spectral response (RSR) function, LED and High Pressure Sodium (HPS) Lamp Spectrum . . . . .	44
2	Το Μιλάνο όπως καταγράφεται στις πηγές δεδομένων: VIIRS, DMSP/OLS, διαβαθμονομημένα DMSP/OLS και σε εικόνα true color MODIS. . . . .	57
3	Βασική λειτουργία του Vegetation Adjust NTL Urban Index (VANUI) . . . . .	88
4	Διάμεσος τιμών νυχτερινής ακτινοβολίας snpp-VIIRS για την Αττική το 2018 . . . . .	93
5	Διάμεσος διορθωμένων τιμών ακτινοβολίας snpp-VIIRS για την Αττική το 2018 . . . . .	94
6	Επιλογή της ημερομηνίας αναφοράς του Dark Object όπου αποδίδεται η ελάχιστη δυνατή φωτεινότητα . . . . .	96
7	Ο συντελεστής διόρθωσης Dark Object για το 2018 . . . . .	97
8	Μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης για το ΑΕΠ και τον δείκτη SoL (NUTS 3, 2014-2017) . . . . .	109
9	Η απόσταση Cook για το μοντέλο γραμμική παλινδρόμησης για το ΑΕΠ και τον δείκτη SoL (NUTS 3, 2014-2017) . . . . .	110
10	Μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης κατόπιν αφαίρεσης ακραίων τιμών για το ΑΕΠ και τον δείκτη SoL (NUTS 3, 2014-2017) . . . . .	111
11	Ανάλυση καταλοίπων για την γραμμική παλινδρόμηση ΑΕΠ και δείκτη SoL: γράφημα Q-Q . . . . .	112
12	Ανάλυση καταλοίπων για την γραμμική παλινδρόμηση ΑΕΠ και δείκτη SoL: γράφημα Residuals vs Fitted . . . . .	113
13	Ανάλυση καταλοίπων για την γραμμική παλινδρόμηση ΑΕΠ και δείκτη SoL: γράφημα Residuals vs Leverage . . . . .	114
14	Ανάλυση καταλοίπων: γράφημα Scale-Location . . . . .	115
15	Διαγράμματα διασποράς του SoL και του πληθυσμού των στατιστικών μονάδων NUTS 3 της Ευρώπης . . . . .	117
16	Η μείωση του ηλεκτροφωτισμού στην Αλέππο της Συρίας, μετά τις πολεμικές συρράξεις . . . . .	118



17	Εγκάρσια τομή (Cross-section) AB για το Μιλάνο για τα δεδομένα εισόδου και τις μεταβλητές ελέγχου κατά την εφαρμογή της βελτίωσης των δεδομένων DMSP/OLS . . . . .	123
18	Ο διάμεσος της ακτινοβολίας νυκτερινών φώτων για την Αττική και την περιοχή Dark object πριν την διόρθωση Dark object . . . . .	126
19	Ο διάμεσος της ακτινοβολίας νυκτερινών φώτων για την Αττική μετά την διόρθωση Dark object . . . . .	127
20	Σύγκριση του διαμέσου των διορθωμένων δεδομένων της Αττικής με τις δύο μεθόδους διόρθωσης (εστίαση) και διάμεσος της διορθωμένης ακτινοβολίας με την μέθοδο Dark object για την Αττική . . . . .	128
21	Σύγκριση του διαμέσου των διορθωμένων δεδομένων της Αττικής με τις μεθόδους Dark object και BRDF και ο συντελεστής διόρθωσης Dark object	129
22	Σύγκριση των μεθόδων διόρθωσης σεληνιακής ακτινοβολίας Dark Object και BRDF για την Αττική (Μηνιαίος μέσος και διάμεσος) . . . . .	130
23	Μύκονος: Διορθωμένα καθημερινά δεδομένα snpp-VIIRS με βάση την μέθοδο Median Shift . . . . .	131
24	Ιστόγραμμα των δεδομένων πριν και μετά την διόρθωση Median Shift. . .	132
25	Έλεγχος εγκυρότητας της διόρθωσης Median Shift με βάση την προσαρμογή στην γραμμή παλινδρόμησης β' βαθμού για την Μύκονο . . . . .	134
26	Διόρθωση σεληνιακής ακτινοβολίας από τα δεδομένα VIIRS με βάση διαφορετικές μεθόδους για την Μύκονο το 2018. . . . .	136
27	Δείκτης SoL και πρόβλεψή του με γραμμικό μοντέλο για την περίοδο 2019-2025 για την Αττική . . . . .	137
28	Έλεγχος εγκυρότητας της πρόβλεψης του SoL με γραμμικό μοντέλο για την Αττική . . . . .	138
29	Δείκτης SoL και πρόβλεψή του με εκθετικό μοντέλο για την Αττική . . .	138
30	Έλεγχος εγκυρότητας της πρόβλεψης του SoL με το εκθετικό μοντέλο για την Αττική . . . . .	139
31	Δείκτης SoL και πρόβλεψή του με μοντέλο πολυωνμικής παλινδρόμησης β' βαθμού για την Αττική . . . . .	139
32	Έλεγχος εγκυρότητας της πρόβλεψης του SoL με το μοντέλο πολυωνμικής παλινδρόμησης β' βαθμού για την Αττική . . . . .	140

33	Δείκτης SoL και πρόβλεψή του με γραμμική μοντέλο για το Μιλάνο . . .	140
34	Έλεγχος εγκυρότητας της πρόβλεψης του SoL με γραμμικό μοντέλο για το Μιλάνο . . . . .	141
35	Δείκτης SoL και πρόβλεψή του με εκθετικό μοντέλο για το Μιλάνο . . .	141
36	Έλεγχος εγκυρότητας της πρόβλεψής του SoL με το εκθετικό μοντέλου για το Μιλάνο . . . . .	142
37	Δείκτης SoL και πρόβλεψή του με μοντέλο πολυωνυμικής παλινδρόμησης β' βαθμού για το Μιλάνο . . . . .	142
38	Έλεγχος εγκυρότητας της πρόβλεψης του SoL με το μοντέλο πολυωνυμι- κής παλινδρόμησης β' βαθμού για το Μιλάνο . . . . .	143
39	Πρόβλεψη της συνολικής αστικής έκτασης σύμφωνα με το μοντέλο SL- EUTH στην Ελλάδα μέχρι το 2030 . . . . .	145
40	Μεταβολή της έκτασης των αστικών περιοχών ανά περιφέρεια. Πρόβλεψη με το μοντέλο SLEUTH . . . . .	146
41	Μεταβολή του ποσοστού της έκτασης αστικών περιοχών επί της συνολι- κής έκτασης ανά περιφέρεια. Πρόβλεψη με το μοντέλο SLEUTH . . . . .	147
42	Ποσοστό αστικής έκτασης ανά περιφέρεια επί της συνολικής αστικής έκτα- σης της Ελλάδας . . . . .	147
43	Δείκτης SoP για την Σαντορίνη το 2017 . . . . .	151
44	Μηνιαίο ΑΕΠ για επιλεγμένα NUTS 3 για τα έτη 2014-2017 . . . . .	160
45	Σύγκριση μηνιαίου ΑΕΠ για επιλεγμένα NUTS 3 για τα έτη 2014-2017 .	161
46	Ραβδόγραμμα του δείκτη χωροθέτησης (LQ1) για την διαφορά νυχτερινής ακτινοβολίας Μαρτίου-Αυγούστου 2019 στους δήμους της Αττικής . . .	167
47	Ραβδόγραμμα του δείκτη χωροθέτησης (LQ1) για την διαφορά νυχτερινής ακτινοβολίας Μαρτίου-Αυγούστου 2020 στους δήμους της Αττικής . . .	168
48	Διάγραμμα σε σχήμα βιολιού (violin plot) για τον δείκτη LQ2 τα έτη 2019,2020 . . . . .	172
49	Η αθροιστική απόκλιση από την κανονικότητα για την περίοδο Μάρτιος- Ιούνιος 2020 για επιλεγμένες νησιωτικές τουριστικές περιοχές και μεγά- λους αστικούς δήμους της Ελλάδα . . . . .	173
50	Μέση τιμή ακτινοβολίας νυχτερινών φώτων ανά ημέρα, εβδομάδα και μήνα στην Μύκονο για το 2019 και 2020 . . . . .	174

51	Μέση τιμή ακτινοβολίας νυχτερινών φώτων ανά ημέρα, εβδομάδα και μήνα στην Σαντορίνη για το 2019 και 2020 . . . . .	174
52	Σύγκριση μέσης εβδομαδιαίας και μηνιαίας ακτινοβολίας στην Μύκονο για το 2019 και 2020 . . . . .	175
53	Σύγκριση μέσης εβδομαδιαίας και μηνιαίας ακτινοβολίας στην Σαντορίνη για το 2019 και 2020 . . . . .	175
54	Αθροιστική απόκλιση (μήνες Φεβρουάριος-Μάιος 2020) από την κανονικότητα για επιλεγμένους τουριστικούς δήμους . . . . .	176
55	Ιστόγραμμα μηνιαίας αθροιστικής απόκλιση ( $\Delta$ ) από την κανονικότητα .	176
56	Το μέγεθος του δείκτη απόκλισης από την κανονικότητα συναρτήσει του πληθυσμού και της εξειδίκευσης στον τουρισμό . . . . .	179

## Κατάλογος χαρτών

1	Μέση τεχνητή φωτεινότητα νυχτερινού ουρανού στο ζενίθ (mcd/m <sup>2</sup> ) για τα NUTS3 . . . . .	16
2	Ψηφιακό μοντέλο και ανάγλυφο εδάφους με αστικές περιοχές (Corine 2012) για τις νήσους Μύκονος και Σαντορίνη . . . . .	61
3	Η κάλυψη γης στην Αττική, έτος 2012. Δεδομένα Corine Land Cover κατηγοριοποιημένα για το μοντέλο SLEUTH . . . . .	66
4	Το οδικό δίκτυο OSM, έτος 2012. Δεδομένα εισόδου για το μοντέλο SLEUTH . . . . .	67
5	Οι πόλεις που χρησιμοποιήθηκαν στην μέθοδο για την βελτίωση των δεδομένων DMSP/OLS . . . . .	69
6	Κάλυψη γης με βάση την κατηγοριοποίηση: MCD12Q1 - International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) . . . . .	76
7	Περιοχές μελέτης για την εφαρμογή της μεθόδου Median Shift και η περιοχή Dark Object . . . . .	77
8	Κάλυψη γης κατά Corine Land Cover 2018 για τις περιοχές μελέτης στον Ελλαδικό χώρο . . . . .	78
9	Μελέτη περιπτώσεων εφαρμογής της μεθόδου φωτορύπανσης, Μύκονος και Σαντορίνη . . . . .	79
10	Η Σικελία . . . . .	83
11	Οι Καποδιστριακοί και Καλλικρατικοί δήμοι. Οι στατιστικές χωρικές μονάδες NUTS 3 . . . . .	84
12	Ο δείκτης βλάστησης NDVI στις περιοχές μελέτης της μεθόδου βελτίωσης των δεδομένων DMSP/OLS . . . . .	88
13	Προσομοίωση αστικής διάχυσης στην (i) Θεσσαλία, (ii) Αττική, (iii) Πάτρα, (iv) Θεσσαλονίκη με βάση το μοντέλο SLEUTH . . . . .	145
14	Προσομοίωση αστικής διάχυσης στην Κρήτη με το μοντέλο SLEUTH . . . . .	146
15	Μήνας με τον μέγιστο δείκτη εποχικότητας, Καποδιστριακοί δήμοι . . . . .	153
16	Μήνας με τον μέγιστο δείκτη εποχικότητας, Καλλικρατικοί δήμοι . . . . .	154
17	Μέγιστη τιμή δείκτη εποχικότητας, Καποδιστριακοί δήμοι . . . . .	155
18	Μέγιστη τιμή δείκτη εποχικότητας, Καλλικρατικοί δήμοι . . . . .	155

19	Διάρκεια εποχικότητας, Καποδιστριακοί δήμοι . . . . .	156
20	Διάρκεια εποχικότητας, Καλλικρατικοί δήμοι . . . . .	156
21	Η μετατόπιση σταθμισμένου χωρικού μέσου της νυχτερινής ακτινοβολίας στον Ελλάδικο χώρο . . . . .	158
22	Η διαφορά (Δ1) νυχτερινής ακτινοβολίας Μαρτίου-Αυγούστου 2019 στους δήμους της Αττικής . . . . .	163
23	Η διαφορά (Δ1) νυχτερινής ακτινοβολίας Μαρτίου-Αυγούστου 2020 στους δήμους της Αττικής . . . . .	163
24	Ο δείκτης χωροθέτησης (LQ1) για την διαφορά νυχτερινής ακτινοβολίας Μαρτίου-Αυγούστου 2019 στους δήμους της Αττικής . . . . .	165
25	Ο δείκτης χωροθέτησης (LQ1) για την διαφορά νυχτερινής ακτινοβολίας Μαρτίου-Αυγούστου 2020 στους δήμους της Αττικής . . . . .	166
26	Η διαφορά (Δ2) νυχτερινής ακτινοβολίας καθημερινών-ΣΚ ανά μήνα στους δήμους της Αττικής . . . . .	170
27	Ο δείκτης χωροθέτησης (LQ2) για την διαφορά νυχτερινής ακτινοβολίας καθημερινών-ΣΚ ανά μήνα στους δήμους της Αττικής . . . . .	171
28	Μηνιαία απόκλιση (Δ) του SoL από την κανονικότητα για τους μήνες Μάρτιος ως Ιούνιος . . . . .	177
29	Αθροιστική απόκλιση (Δ) (Μάρτιος-Ιούνιος) για το SoL . . . . .	178
30	Ο κορεσμός του αισθητήρα DMSP/OLS, σε υπόβαθρο DMSP/OLS στην Αθήνα . . . . .	181
31	Ο κορεσμός του αισθητήρα DMSP/OLS σε υπόβαθρο ISS στην Αθήνα . . . . .	182
32	Η ακτογραμμή και τα όρια του Υμηττού, υπόβαθρο ISS . . . . .	183
33	Η ακτογραμμή και τα όρια του Υμηττού, υπόβαθρο OLS . . . . .	183

## Ακρωνύμια

Συντομογραφία	Περιγραφή
BRDF	: Bidirectional reflectance distribution function
DMSP/OLS	: Defense Meteorological Satellite Program Operational Line Scanner
DNB	: Day-Night Band
DSM	: Dense Sampling Method
EDR	: Enviromental Data Records
EOG	: Earth Observations Group
GTM	: Ground Track Mercator
HDF	: Hierarchical Data Format
ISS	: International Space Station
JPSS	: Joint Polar Satellite System
LED	: Light Emitting Diode
LJ1-01	: Luojia 1-01
LQ	: Location Quotient
LST	: Land Surface Temperature
MAUP	: Modifiable Areal Unit Problem
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
NPOESS	: National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System
NUTS	: Nomenclature of territorial units for statistics
RDR	: Raw Data Records
SAR	: Synthetic-aperture radar
SDR	: Sensor Data Records
SLEUTH	: Slope, Land use, Exclusion, Urban extension, Transportation and Hillshade
snpp-VIIRS	: Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
SNR	: Signal to Noise Ratio
SoL	: Sum of Lights
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
TVANUI	: Temperature Vegetation Adjusted Night Time Lights Urban Index
UTC	: Coordinated Universal Time
VANUI	: Vegetation Adjust NTL Urban Index
ΑΕΠ	: Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν
ΕΛ/ΛΑΚ	: Ελεύθερο Λογισμικό/Λογισμικό Ανοικτού Κώδικα
Σ.Γ.Π.	: Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής θα ήθελα να εκφράσω τις ευγνωμοσύνη μου σε όλους όσους με υποστήριξαν. Ιδιαίτερα στον καθηγητή Δημήτρη Σταθάκη που με παρότρυνε να δώσω αυτόν τον δύσκολο αγώνα και με τις πολύτιμες οδηγίες του με βοήθησε να επικεντρωθώ στον στόχο μου.

Επίσης, ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον αναπληρωτή καθηγητή Βασίλη Τσέλιο και τον καθηγητή Δήμο Πανταζή, για την συνεργασία και για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της έρευνας.

Επιπροσθέτως, θεωρώ υποχρέωση μου να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για την οικονομική υποστήριξη που μου προσέφερε κατά την διάρκεια της διατριβής μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση».

Τέλος, θα ήμουν αγνώμων αν παρέλειπα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της οικογένειάς μου που με υποστήριξαν στην δύσκολη καθημερινότητα.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βασικό εργαλείο για τη διεξαγωγή της έρευνας αποτελούν τα δεδομένα νυχτερινών φώτων δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Η τηλεπισκόπηση αποτελεί μια διαδικασία λήψης δεδομένων ακτινοβολίας (ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης) της γήινης επιφάνειας και του περιβάλλοντος με στόχο την καταγραφή, την παρακολούθηση και αναγνώριση συμβάντων ή αντικειμένων στον απομακρυσμένο στόχο.

Τα υπό καταγραφή δεδομένα μπορεί να είναι φυσικά φαινόμενα ή ανθρωπογενή. Ανάλογα με τον τύπο του υπό παρακολούθηση φαινομένου, διαφορετικά κανάλια του φάσματος είναι κατάλληλα να αποδώσουν χρηστική πληροφορία για την περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνολογίας τηλεπισκόπησης αποτελούν τα δορυφορικά συστήματα. Μερικές εφαρμογές τηλεπισκόπησης είναι η παρακολούθηση της τήξης των πάγων στους πόλους, της εξέλιξη μιας πυρκαγιάς, η πρόγνωση καιρικών συνθηκών μέσω της παρακολούθησης των νεφών, η καταγραφή μιας δασικής ή γεωργικής έκτασης, η εξάπλωση του δομημένου χώρου μιας πόλης.

Μια βασική προϋπόθεση στην έρευνα των αστικών φαινομένων και της δυναμικής των πόλεων είναι η διαθεσιμότητα των δεδομένων απογραφής. Ωστόσο, η χρησιμότητά των δεδομένων αυτών περιορίζεται από μια σειρά αρνητικών χαρακτηριστικών. Η συστηματική απογραφή πληθυσμιακών και οικονομικών δεδομένων ανά τακτά χρονικά διαστήματα γίνεται σε τέτοια συχνότητα (π.χ. ανά δεκαετία) η οποία δεν επιτρέπει την ενδελεχή παρακολούθηση της αστικής δραστηριότητας και των τάσεων της μεταβολής της δυναμικής των πόλεων σε λεπτομερέστερα χρονικά σημεία. Επιπλέον, ο πλούτος των δεδομένων αυτών είναι άμεσα συνυφασμένος με την χωρική κλίμακα απογραφής. Έτσι, ενώ σε επίπεδο χώρας μπορεί να διατίθεται πληθώρα στατιστικών στοιχείων, σε μικρότερα διοικητικά επίπεδα, όπως οι δήμοι, αυτά τα δεδομένα μπορεί να μην είναι διαθέσιμα. Αυτή η χωροχρονική διαφοροποίηση ως προς την απογραφή και διαθεσιμότητα των δεδομένων μπορεί να διαφέρει από χώρα σε χώρα και ανάλογα με το επίπεδο ανάπτυξης. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η συγκριτική έρευνα της αστικής δραστηριότητας καθίσταται δύσκολη, πόσω μάλλον όταν η έρευνα αυτή μπορεί να είναι παγκόσμιας κλίμακας.

Η τηλεπισκόπηση έρχεται να προσφέρει εναλλακτικά εργαλεία στην έρευνα του χώρου και των πόλεων, συμπληρωματικά με την συλλογή δεδομένων μέσω των απογραφών. Τα δεδομένα τηλεπισκόπησης, συνήθως δορυφορικά, διατίθενται σε ποικιλόμορφη και



αναλυτικότερη χωρική και χρονική κλίμακα επιτρέποντας την δημιουργία πληρέστερων χρονοσειρών για την ενδελεχή και συγκριτική έρευνα του αστικού χώρου. Τα δεδομένα νυχτερινών φώτων μπορούν, με βάση αυτή την διαπίστωση, να αποτελέσουν ένα άριστο εργαλείο για την μελέτη της αστικοποίησης και των δεικτών με την οποία αυτή μετράται σε παγκόσμιο επίπεδο με δεδομένη την έλλειψη απογραφικών δεδομένων ή την χρονική περιοδικότητα της απογραφής αυτών.

Οι δυνατότητες που προσφέρουν τα δεδομένα τηλεπισκόπησης δεν αφορούν μόνο την έρευνα του αστικού περιβάλλοντος και τη δυναμική τους αλλά και την μελέτη των φυσικών φαινομένων και των περιβαλλοντικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει ο πλανήτης.

Με κύριο άξονα τα δεδομένα τηλεπισκόπησης και τις δυνατότητες που αυτά προσφέρουν τίθενται συγκεκριμένα ερευνητικά ερωτήματα, συντάσσεται η μεθοδολογία της έρευνας και ορίζονται οι στόχοι της. Πρόκληση και ζητούμενο σε αυτήν την προσπάθεια αποτελεί η διεπιστημονικότητα της έρευνας και η αναγκαιότητα να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι και εργαλεία από πολύπλευρους επιστημονικούς τομείς (φυσική, στατιστική, προγραμματισμός, γεωγραφία, τηλεπισκόπηση). Κρίσιμος παράγοντας για την εκτέλεση των πειραμάτων και την υποστήριξη των θέσεων της διατριβής αποτελεί η διαθεσιμότητα και η ορθότητα στατιστικών στοιχείων και δορυφορικών δεδομένων, συνθήκη η οποία δεν είναι αυτονόητη σε όλες τις περιπτώσεις ωστόσο πρέπει να εξασφαλιστεί.

## 1.1 ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ένας από τους πλέον περιοριστικούς παράγοντες για την παρακολούθηση βραχυχρόνιων αστικών φαινομένων είναι η έλλειψη άμεσα διαθέσιμων και αξιόπιστων δεδομένων που καταγράφουν οικονομικές και πληθυσμιακές μεταβλητές και μεταβολές. Αυτή η έλλειψη σε αρκετές περιπτώσεις δεν περιορίζεται μόνο στην συχνότητα διάθεσης των δεδομένων αλλά σε αρκετές τριτοκοσμικές χώρες η έλλειψη αυτή μπορεί να είναι μόνιμη και καθολική. Επιπλέον, για τις έρευνες που επικεντρώνονται σε ενδο-περιφερειακή κλίμακα στα πλαίσια ενός κράτος και απαιτούν πιο αναλυτικά δεδομένα από εκείνα της εθνικής/συγκεντρωτικής κλίμακας η έλλειψη σχετικών δεδομένων αποτελεί πρόβλημα για την ανάλυση των περιφερειακών ανισοτήτων και του ρυθμού σύγκλισης και την ανάλυση της οικονομικής ανάπτυξης των επιμέρους περιφερειών.

Για την υπέρβαση της έλλειψης απογραφικών δεδομένων οι έρευνες άρχισαν να στρέφονται στην αξιοποίηση των δορυφορικών δεδομένων σαν ένα μέσο υποκατάστασης και συμπλήρωσης των ελλειπόντων απογραφικών δεδομένων (Chen και Nordhaus, 2011· Elvidge et al., 1997a· Henderson et al., 2012· Liu et al., 2011). Τα δεδομένα δορυφορικής λήψης παρέχονται σε παγκόσμια κάλυψη, με συνεπή και επαναλαμβανόμενο τρόπο. Οι φυσικές επιστήμες χρησιμοποιούν σε συστηματικό και εντατικό βαθμό τα δορυφορικά δεδομένα ενώ πλέον δεν είναι λίγες και οι έρευνες οικονομικής και κοινωνικής φύσεως που υποστηρίζονται από αυτά.

Από την διαχρονική χρήση των δεδομένων νυχτερινών φώτων στα αστικά φαινόμενα προκύπτει ότι αυτά συσχετίζονται και συμμεταβάλλονται σε σημαντικό βαθμό με θεμελιώδεις μεταβλητές που συνιστούν την αστική και οικονομική δραστηριότητα των πόλεων και τις διαδικασίες της αστικοποίησης. Τα δορυφορικά δεδομένα νυχτερινών φώτων αποτελούν υποκατάστατη μεταβλητή για να προσδιοριστεί το μέγεθος και η πυκνότητα του αστικού πληθυσμού (Mellander et al., 2015), να εκτιμηθεί το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ) (Sutton et al., 2007), η κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος (Amaral et al., 2005· Chand et al., 2009· Elvidge et al., 1997a) και να αναλυθούν οι περιφερειακές ανισότητες και τα χωρικά πρότυπα ανάπτυξης (Tselios et al., 2019).

Η σταδιακή βελτίωση των νυχτερινών δεδομένων προσδίδει νέες δυνατότητες στις έρευνες του αστικού περιβάλλοντος και των αστικών φαινομένων. Την αρχαιότερη και πλέον μακροχρόνια χρονοσειρά των δεδομένων Defense Meteorological Satellite Program Operational Line Scanner (DMSP/OLS) με αρκετούς τεχνικούς περιορισμούς (υπερλάμψη,

έλλειψη διαβαθμονόμησης, ραδιομετρικός κορεσμός) διαδέχεται η νέα σειρά δεδομένων Suomi NPP Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (snpp-VIIRS). Εκτός από τα καλύτερα τεχνικά χαρακτηριστικά της (υψηλότερη χωρική και ραδιομετρική ανάλυση, διαβαθμονόμηση) η συχνότητα διάθεσης των δεδομένων σε ποικίλα χρονικά βήματα είναι τέτοια που πλέον επιτρέπει την τακτική μελέτη του αστικού χώρου και την ανταπόκριση του σε βραχυχρόνια φαινόμενα και γεγονότα. Μάλιστα τα δεδομένα snpp-VIIRS “Black Marble” διατίθενται σε ημερήσια βάση γεγονός που επιτρέπει την ενδοσκόπηση των πόλεων μέσω της εφαρμογής καινοτόμων ερευνών που αφορούν τα πρότυπα μετακίνησης την επίδραση εκτάκτων συνθηκών και φυσικών καταστροφών ή εορταστικών συμβάντων.

Κατά συνέπεια η επιλογή των δεδομένων νυχτερινών φώτων για την ανάλυση της ελληνικής αστικής δραστηριότητας δεν είναι τυχαία. Στην παρούσα διατριβή, η ένταση της ακτινοβολίας των νυχτερινών φώτων, αποτελεί το βασικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο διατυπώνονται οι υποθέσεις εργασίας και στηρίζεται η ορθότητα των επιχειρημάτων της. Η βασική υπόθεση εργασίας (δεδομένου έχει αποδειχθεί, και είναι πλέον επιστημονικά αποδεκτό) είναι ότι η ένταση της ακτινοβολίας των νυχτερινών φώτων είναι αντιπροσωπευτική μεταβλητή της αστικοποίησης, της αστικής εξάπλωσης (urban sprawl) και γενικότερα της αστικής δραστηριότητας και συσχετίζεται με σημαντικά μεγέθη της όπως ο πληθυσμός, η απασχόληση, το ΑΕΠ, το εισόδημα και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Διαχρονικά, από όταν άρχισαν να διανέμονται τα δεδομένα νυχτερινών φώτων, έχει προκύψει μια πληθώρα ερευνών που εκμεταλλεύονται τα πλεονεκτήματά τους για να αναλύσουν θέματα που σχετίζονται με το περιβάλλον, την οικονομία, τον παγκόσμιο πληθυσμό, την αστικοποίηση, τις φυσικές καταστροφές και τις ανθρωπιστικές κρίσεις. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στις έρευνες που αφορούν την χρήση νυχτερινών φώτων.

## 1.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

Στην παγκόσμια επιστημονική βιβλιογραφία έχει καταγραφεί και αποδειχθεί, ότι η ένταση των νυχτερινών φώτων της πόλης αποτελεί μία αξιόπιστη υποκατάστατη μεταβλητή για να περιγράψει την πληθυσμιακή δυναμική, το ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα και την οικονομική δραστηριότητά της. Σύμφωνα με τους (Mellander et al., 2015) υπάρχει υψηλή συσχέτιση με τον πληθυσμό και την πληθυσμιακή πυκνότητα. Σε μικρότερο βαθμό συσχετίζονται τα νυχτερινά φώτα με τους μισθούς (υπερεκτίμηση στα αστικά κέντρα, υποτίμηση στις αγροτικές περιοχές).

Ακόμα οι Stathakis et al., 2015 με την αξιοποίηση νυχτερινών φώτων DMSP/OLS αφενός έδειξαν ότι υπάρχει διαφοροποιημένη αστικοποίηση στην Ευρώπη κατά την περίοδο 1992-2021 και αφετέρου ότι υπάρχει υψηλή συσχέτιση της νυχτερινής ακτινοβολίας με το πληθυσμό και το ΑΕΠ κυρίως σε εθνικό και λιγότερο σε περιφερειακό επίπεδο. Ωστόσο εφιστούν προσοχή στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων καθώς οι μεταβολές στην ακτινοβολία μπορεί να μην είναι μόνο αποτέλεσμα της αστικοποίησης ή αποαστικοποίησης αλλά υιοθέτηση νέων πολιτικών εξοικονόμησης ενέργειας. Επίσης, μέσω Διερευνητικής Ανάλυσης Χωρικών Δεδομένων (Exploratory Spatial Data Analysis) και ανάλυση χωρικής σχέσης (analysis of spatial association) και την χρήση δεδομένων νυχτερινών φώτων διαπίστωσαν (Tselios και Stathakis, 2018) ότι οι παγκοσμιούπολεις και μεγαπόλεις αποτελούν πυρήνες μεγάλης οικονομικής ανάπτυξης στην Ευρώπη.

Οι Ma et al. (2014) εξέτασαν την ποσοτική συσχέτιση δεδομένων νυχτερινού φωτός από το ραδιόμετρο snpp-VIIRS με οικονομικές και κοινωνικές μεταβλητές. Διαπίστωσαν ότι η συνολική νυχτερινή ακτινοβολία έχει σημαντική θετική συσχέτιση με δύο δείκτες των αεροδρομίων: την κίνηση επιβατών και την κίνηση αεροσκαφών. Επιπλέον, εξακρίβωσαν ισχυρή συσχέτιση με άλλες τέσσερις μεταβλητές αστικοποίησης, τον πληθυσμό, το ΑΕΠ, την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και το οδικό δίκτυο. Οι Savin et al. (2017) μέσω της ανάλυσης δεδομένων DMSP/OLS απέδειξαν την υψηλή συσχέτιση με δεδομένα πληθυσμού και ΑΕΠ για την Ρωσική Ομοσπονδία. Ακόμα διαπίστωσαν ότι κατά την περίοδο 1993-2001 η κοινωνικοοικονομική κατάσταση στην χώρα επιδεινώθηκε ενώ από το 2001 η χώρα άρχισε να επανακάμπτει.

Στις ΗΠΑ (Imhoff et al., 1997a), τα νυχτερινά φώτα από το σύστημα DMSP/OLS συνδυάστηκαν με δεδομένα απογραφών προκειμένου να υπολογιστούν οι δομημένες εκτάσεις και η επίδρασή τους στους εδαφικούς πόρους. Η ανάπτυξη των πόλεων φαίνεται να ακο-

λουθεί την ποιότητα του εδάφους, με τα καλύτερα εδάφη να είναι και τα πλέον αστικοποιημένα. Σε αρκετές περιπτώσεις μοναδικές εδαφικές κατηγορίες έχουν πλήρως καταληφθεί από την αστική εξάπλωση. Οι Liu et al. (2012) ερεύνησαν την αστική εξάπλωση στην Κίνα από το 1992 ως το 2008 ενσωματώνοντας στην έρευνά τους τεχνικές συστηματικής διόρθωσης διαχρονικών και πολυ-δορυφορικών δεδομένων νυχτερινών φώτων.

Τόσο η ένταση όσο και η έκταση των ανθρωπογενών νυχτερινών φώτων είναι απόρροια και συνδυασμός μιας σειράς οικονομικών, κοινωνικών (Elvidge et al., 2009a· Gibson et al., 2019) και πολιτισμικών εκφάνσεων (Román και Stokes, 2015). Παρότι στα δεδομένα συνυπάρχουν και εκπομπές από μη αστικές δραστηριότητες (ηφαιστειακή δραστηριότητα, αλιευτικά σκάφη, φωτιές από φυσικές ή ανθρωπογενείς πηγές) τα νυχτερινά φώτα έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την έρευνα της αστικοποίησης και την κατανομή και μεταβολή του πληθυσμού (Elvidge et al., 1997a· Elvidge et al., 1997b· Imhoff et al., 1997b· Small et al., 2005).

Επιπλέον τα νυχτερινά φώτα πέρα από την δυνατότητα που προσφέρουν ως υποκατάστατη (proxy) μεταβλητή για την εκτίμηση του ΑΕΠ και του πληθυσμού μπορούν να αξιοποιηθούν περαιτέρω για την χωρική αποτύπωση αυτών των μεγεθών σε κλίμακες πιο χρήσιμες από τις τυπικές και έτσι απο σημειακές μετρήσεις να αναχθούν σε εκτατικές αποδόσεις μιας μεταβλητής (Bagan και Yamagata, 2015· Liu et al., 2011· Sutton et al., 2003· Tan et al., 2018· Zhuo et al., 2009).

Έτσι οι Tan et al. (2018) υπολόγισαν την πληθυσμιακή πυκνότητα για την Κίνα για την περίοδο 2000-2010 σε χωρική ανάλυση 1 km<sup>2</sup>. Επιπλέον, οι Bagan και Yamagata (2015) με την χρήση δεδομένων DMSP/OLS, πληθυσμιακών δεδομένων και δεδομένων χρήσεων γης μελέτησαν την αστική εξάπλωση στην Ιαπωνία για την περίοδο 1990-2006. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της έρευνάς τους, οι αστικές και δομημένες περιοχές συσχετίζονται με την πληθυσμιακή πυκνότητα και η αύξηση στις δομημένες εκτάσεις στα περίχωρα των μεγαπόλεων σχετίζεται με την αύξηση του πληθυσμού. Αντιθέτως, στις αγροτικές και λιγότερο αστικοποιημένες περιοχές η πληθυσμιακή πυκνότητα μειώνεται.

Η συλλογή δεδομένων για οικονομικές μεταβλητές είναι κοστοβόρα και χρονοβόρα διαδικασία, ιδιαίτερα σε μικρότερες απογραφικές οντότητες (π.χ. νομοί, δήμοι κτλ.). Επιπλέον η αξιοπιστία των απογραφικών δεδομένων επηρεάζεται από την επίδραση της παραοικονομίας αφού τα οικονομικά μεγέθη αυτής δεν συμπεριλαμβάνονται στην απογραφή. Τα νυχτερινά φώτα αποτελούν χρήσιμη υποκατάστατη (proxy) μεταβλητή που μπορεί να

συμβάλλει στην εκτίμηση οικονομικών (ΑΕΠ) και πληθυσμιακών δεδομένων σε επιμερισμένο (disaggregated) χωρικό και χρονικό επίπεδο (Henderson et al., 2012· Lazar, 2010· Stathakis και Baltas, 2018· Sutton et al., 2007· Triantakostas και Stathakis, 2014). Μάλιστα στις εκτιμήσεις αυτές, όσον αφορά τα οικονομικά μεγέθη, μπορεί να προβλεφθεί και το ύψος της παραοικονομίας (Lazar, 2010). Με βάση αυτή την δυνατότητα που προσφέρουν τα δεδομένα νυχτερινών φώτων, πολλές προσπάθειες αφιερώθηκαν στην χαρτογράφηση της παγκόσμιας και περιφερειακής οικονομικής δραστηριότητας, της κατανομή του πλούτου και του πληθυσμού (Elvidge et al., 2001, 2009a· Lazar, 2010· Tselios et al., 2020).

Οι Amaral et al. (2006) αξιοποίησαν τις εικόνες DMSP/OLS για την αναγνώριση οικισμών και την πληθυσμιακή δυναμική τους στον Αμαζόνιο της Βραζιλίας. Κατασκεύασαν ένα μωσαϊκό σταθερού φωτός DMSP/OLS για το 2002 από το οποίο ανιχνεύθηκαν με ακρίβεια όλοι οι οικισμοί με πληθυσμό άνω των 5.000 κατοίκων και συσχέτισαν δημογραφικά στοιχεία με τις εικόνες. Ανέδειξαν την αδυναμία των δεδομένων να ανιχνεύσουν οικισμούς μικρής έκτασης ( $< 2,5 \text{ km}^2$ ).

Στην λεκάνη του Αμαζονίου είχε προηγηθεί έρευνα (Amaral et al., 2005) συσχέτισης των φώτων DMSP/OLS με τους οικισμούς, τον αστικό πληθυσμό και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Αναγνωρίστηκαν 248 οικισμοί σε ένα σύνολο 749 δήμων (municípios) και αποδείχτηκε, σε συνδυασμό με δορυφορικές εικόνες Landsat TM and JERS, ότι το νυχτερινό φως σχετίζεται με δραστηριότητες όπως η εξόρυξη, οι κατασκευές και η βιομηχανική δραστηριότητα.

Οι Cauwels et al. (2014) μελέτησαν την δυναμική και την χωρική κατανομή των νυχτερινών φώτων. Τα νυχτερινά φώτα, ακολουθώντας την παγκόσμια οικονομική εξέλιξη μετατοπίζονται ανατολικά με έναν ρυθμό 60 km το έτος. Η ενσωμάτωση του χωρικού συντελεστή Gini φώτων αποκάλυψε την χωρική κατανομή των οικισμών σε παγκόσμια κλίμακα. Η διαχρονική αύξηση του συντελεστή Gini υποδεικνύει χωρική συγκέντρωση του φωτός. Τα νυχτερινά φώτα αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την παρακολούθηση της επέκτασης των αναπτυσσόμενων χωρών (όπως η Ινδία και η Βραζιλία), την ανάπτυξη νέων πόλων συσσώρευσης (όπως η Σαγκάη στην Κίνα ή το Δέλτα του Νείλου στην Αίγυπτο), της συρρίκνωσης χωρών με δημογραφική μείωση και περιορισμό του αστικού πληθυσμού (όπως η Ρωσία και η Ουκρανία) αλλά και της αξιολόγησης της έκβασης προγραμμάτων περιορισμού φωτορύπανσης σε δυτικές χώρες (Καναδάς και Ηνωμένο Βασίλειο).

Ωστόσο, δεν λείπουν και οι διαφορετικές διαπιστώσεις για την χρησιμότητα των νυχτερινών φώτων ως υποκατάσταση μεταβλητή. Οι Bickenbach et al. (2016) υποστηρίζουν ότι τα νυχτερινά φώτα δεν μπορούν να αποτελέσουν ικανοποιητική υποκατάσταση μεταβλητή για την εκτίμηση του περιφερειακού κυρίως ΑΕΠ. Πράγματι, τα νυχτερινά φώτα επηρεάζονται από μια σειρά παραγόντων που δεν συσχετίζονται με την οικονομική δραστηριότητα (φαινολογικός κύκλος της βλάστησης, χιονοκάλυψη, αδέσποτο φως, γωνίες λήψεις). Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και οι Gibson et al. (2019) που διαπιστώνουν ότι τα δεδομένα DMSP/OLS δεν αποτελούν κατάλληλη υποκατάστατη μεταβλητή για το εξω-αστικό ΑΕΠ, δεδομένου της αρνητικής σχέσης μεταξύ των δύο μεταβλητών για 399 αγροτικές μονάδες που διερεύνησαν. Ακόμα στην ίδια έρευνα αναφέρεται ότι η χωρική ανισότητα υποτιμάται με τα δεδομένα DMSP/OLS στις αστικές περιοχές, τα δεδομένα DMSP/OLS παρέχουν μικρή ερμηνευτική δύναμη, αβεβαιότητα όσον αφορά χρονοσειρές ΑΕΠ που εκτιμήθηκαν με αυτά και ασταθή σχέση γενικότερα μεταξύ αυτών και του ΑΕΠ.

Οι Addison και Stewart (2015) χρησιμοποίησαν εικόνες DMSP/OLS ως υποκατάστατη (proxy) μεταβλητή (ειδικά σε περιοχές με ανεπαρκή ή ανύπαρκτα δεδομένα) για την παρακολούθηση και ερμηνεία οικονομικών μεταβλητών (ΑΕΠ σε σταθερές τιμές, ΑΕΠ μη αγροτικού τομέα, προστιθέμενη αξία μεταποίησης, ηλεκτρική ενέργεια, συνολικό πληθυσμό και αστικό πληθυσμό). Συμπέραναν ότι τα δεδομένα DMSP/OLS δεν έχουν επαρκή ερμηνευτική αξία σε όλες τις περιπτώσεις μεταβλητών εκτός από την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος.

Ο υπολογισμός του πληθυσμού, της πληθυσμιακής πυκνότητας ή του ΑΕΠ για να είναι χρήσιμος στην έρευνα πρέπει να παρέχεται στην κατάλληλη χωρική και χρονική κλίμακα. Η κινητικότητα του πληθυσμού σε 24-ωρη βάση (μετακινήσεις για την εργασία, την κατοικία, τις αγορές, την διασκέδαση κτλ.) υποδηλώνει ότι ο πραγματικός ή προσωρινός πληθυσμός μπορεί να αποτελέσουν σημαντικά μέτρα για την μελέτη της αστικής δραστηριότητας. Ωστόσο τα πληθυσμιακά δεδομένα, που κατά κύριο λόγο αντλούνται μέσα από απογραφές, δεν είναι διαθέσιμα στην κατάλληλη χωρική και χρονική κλίμακα. Αντίθετα με τα δεδομένα των απογραφών, που καταγράφονται σε ακανόνιστες χωρικές μονάδες και αποτυπώνουν την τρέχουσα κατάσταση σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, τα πληθυσμιακά δεδομένα που υπολογίζονται με βάση τα νυχτερινά φώτα προσφέρουν αφενός την ομοιομορφία της καταγραφής στον χώρο (grid) ενώ ταυτόχρονα επιστρέφουν και

μια τακτική ροή των μεγεθών στον χρόνο.

Η ιδέα να εκτιμηθεί ο πληθυσμός μέσω της τηλεπισκόπησης δεν είναι πρόσφατη. Ήδη από την δεκαετία του '70 έχουν γίνει οι πρώτες προσπάθειες για την εκτίμηση του πληθυσμού μέσω της τηλεπισκόπησης και των Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.). Μάλιστα οι δυνατότητες είναι τέτοιες που έχει προταθεί και μεθοδολογία για την εκτίμηση του πληθυσμού μέχρι και σε επίπεδο κτηρίου (Kaimaris και Patias, 2016). Η ιδιότητα των νυχτερινών φώτων ως υποκατάστατη μεταβλητή για τον υπολογισμό οικονομικών και δημογραφικών μεταβλητών προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα στην κατανόηση της αστικής δυναμικής και των αστικών δεικτών και μεγεθών. Έτσι για παράδειγμα σε περιπτώσεις χωρών που δεν είναι ικανές να διεξάγουν απογραφές, τα νυχτερινά φώτα θα μπορούσαν να παρέχουν αντίστοιχες προσεγγίσεις για μεταβλητές όπου η συσχέτιση με τα νυχτερινά φώτα έχει αποτιμηθεί επαρκώς. Επιπλέον, τα νυχτερινά φώτα παρέχουν την δυνατότητα να υπάρχουν εκτιμήσεις ενδο-απογραφικές για τον πληθυσμό. Σε αυτή την λογική επικεντρώνεται η προσπάθεια των Sutton et al. (2003) όπου στόχο έχουν τον υπολογισμό της προσωρινής πληθυσμιακής πυκνότητας με την χρήση των νυχτερινών φώτων DMSP/OLS ως υποκατάστατη μεταβλητή. Οι Stathakis και Baltas (2018) χρησιμοποίησαν τα νυχτερινά φώτα snpp-VIIRS στην εκτίμηση του εποχικού πληθυσμού στους δήμους της Ελλάδας.

Η τηλεπισκόπηση και τα δορυφορικά δεδομένα έχουν αξιοποιηθεί για την καταγραφή, εκτίμηση και αποτίμηση καταστροφών και την πρόβλεψη φυσικών φαινομένων όπως πυρκαγιές, πλημμύρες, καύσωνες, ξηρασία, σεισμοί, τσουνάμι, ηφαιστειακές εκρήξεις και κατολισθήσεις (Gitas et al., 2008· Gitas et al., 2004· Ngo et al., 2018· Poursanidis και Chrysoulakis, 2017· Tralli et al., 2005). Επιπλέον, πέρα από τις φυσικές καταστροφές η τηλεπισκόπηση έχει χρησιμοποιηθεί και στην παρακολούθηση και έλεγχο ανθρωπογενών παρεμβάσεων και καταστροφών τόσο στα φυσικά οικοσυστήματα όσο και στο αστικό περιβάλλον (Elshorbany et al., 2021· Sreekanth et al., 2017· Topouzelis, 2008· Topouzelis et al., 2019· Yang et al., 2020· Zhang et al., 2020).

Αλλά και τα δεδομένα νυχτερινών φώτων DMSP/OLS πέρα από τις εφαρμογές στο αστικό πεδίο χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση περιβαλλοντικών κινδύνων και των επιπτώσεων φυσικών καταστροφών. Οι Aubrecht et al. (2008) εκτίμησαν την επιβάρυνση των κοραλλιογενών υφάλων από τα τεχνητά φώτα με την υπόθεση εργασίας ότι η ζημιά των υφάλων είναι ανάλογη της εγγύτητας με το τεχνητό φως. Με την χρήση εικόνων



DMSP/OLS ανάλυσαν την επιβάρυνση της αστικοποίησης, του φωτισμού των βαρέων αλιευτικών σκαφών και των παράκτιων βιομηχανικών καύσεων στους κοραλιογενείς υφάλους και την βιοποικιλότητα τους.

Οι Mann et al. (2016) χρησιμοποίησαν τα δεδομένα snpp-VIIRS με δεδομένα μετρητών ηλεκτρικής ενέργειας των νοικοκυριών με στόχο να αποτιμήσουν την αξιοπιστία του δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στην Δυτική Ινδία. Υιοθέτησαν τεχνικές μηχανικής εκμάθησης (machine learning) για να προσδιορίσουν την διακοπή και την συχνότητα διακοπής της ηλεκτρικής ενέργειας ανά χωρική μονάδα (επίπεδο pixel ψηφιδωτών δεδομένων).

Οι Cole et al. (2017) σε ανάλογη προσέγγιση επιχείρησαν τον προσδιορισμό της έκτασης της διακοπής ηλεκτρικής ενέργειας ύστερα από τον τυφώνα Sandy το 2012 μέσω της αναγνώρισης της απώλειας νυχτερινών φώτων όπως καταγράφονται από τα δεδομένα snpp-VIIRS. Επικουρικά, με τοπικά γεωχωρικά δεδομένα η μέθοδος υποδεικνύει περιοχές που χρήζουν άμεσης ανθρώπινης ενέργειας για την αποκατάσταση των βλαβών. Μέσω της χρήσης νευρωνικών δικτύων, γνωστών σημείων διακοπής ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένων snpp-VIIRS και τοπικών πληθυσμιακών δεδομένων έφτιαξαν ένα προϊόν πρόβλεψης διακοπής ηλεκτρικής ενέργειας στον χώρο. Εκτός από την καταγραφή της αρχικής απώλειας των νυχτερινών φώτων από τον τυφώνα μέσω των δεδομένων snpp-VIIRS αναγνωρίστηκε και η σταδιακή αποκατάστασή της. Η μεθοδολογία έχει την προοπτική να αποτελέσει ένα μοντέλο για τη παγκόσμια παρακολούθηση της διακοπής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο ίδιο πλαίσιο, στην παρακολούθηση φαινομένων φυσικής καταστροφής, κινήθηκαν και οι Zhao et al. (2018) μέσω της αποτίμησης καταστροφών από σεισμούς, πλημμύρες και καταιγίδες με την συνδρομή βραχυχρόνιων δεδομένων νυχτερινών φώτων snpp-VIIRS (δεδομένα καθημερινής συχνότητας). Με δεδομένα ενός μήνα πριν και 10 μέρες μετά το συμβάν υπολογίστηκε ο δείκτης PNL (Percent of Normal Light), που είναι ο λόγος της μέσης ακτινοβολίας φώτων πριν και μετά το συμβάν. Δείκτης με τιμή μικρότερη της μονάδας υποδεικνύει προσβολή της περιοχής από το συμβάν φυσικής καταστροφής. Τα αποτελέσματα της μεθόδου συγκρίθηκαν με χάρτες καταστροφών και πλημμυρών, με δεδομένα ραντάρ και αναφορές για διακοπή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, οι Fan et al. (2019) χρησιμοποίησαν τα δεδομένα snpp-VIIRS για την άμεση αποτίμηση καταστροφών στους σεισμούς του Νεπάλ το 2015 και της Χιλής το 2014 & 2015. Τα αποτελέσματα

έδειξαν ότι τα νυχτερινά φώτα είναι πιο ακριβή ως προς την αποτίμηση των καταστροφών όσο πιο μεγάλες είναι αυτές.

Εκτός από την παρακολούθηση και αποτίμηση φυσικών καταστροφών, τα δεδομένα νυχτερινών φώτων συνεισέφεραν και στην παρακολούθηση ανθρωπιστικών κρίσεων. Οι Li και Li (2014) με δεδομένα DMSP/OLS και για την περίοδο 2011-2014 διαπίστωσαν την μείωση των φώτων κατά 74 % κατά την διάρκεια της κρίσης στην Συρία. Στην συγκεκριμένη περίπτωση φάνηκε άμεσα ότι η πληθυσμιακή εκτόπιση είναι άμεσα συσχετισμένη με την μείωση των νυχτερινών φώτων. Παρόμοια χρήση είχε και η αξιοποίηση των νυχτερινών φώτων DMSP/OLS (Witmer και O'Loughlin, 2011) για τον εντοπισμό των αποτελεσμάτων του πολέμου στην περιοχή του Καυκάσου ανάμεσα σε Ρωσία και Γεωργία όπου αναγνωρίστηκαν μεγάλες μεταναστευτικές ροές και καταστροφικά συμβάντα όπως πυρκαγιές.

Το μέγεθος και ο ρυθμός της εξάπλωσης των πόλεων σε παγκόσμιο επίπεδο επιβάλλουν την παρακολούθηση, την μελέτη και την κατανόησή τους. Οι διαδικασίες αυτές, εκτός των άλλων, προϋποθέτουν την μοντελοποίηση και ποσοτικοποίηση του φαινομένου. Διαχρονικά έχουν εφαρμοστεί μια ευρεία χρήση τεχνικών και μεθόδων για την αποτύπωση και παρακολούθηση της αστικής εξάπλωσης και την συνάρτηση κοινωνικών και οικονομικών φαινομένων με τα νυχτερινά φώτα.

Η έννοια της αστικής εξάπλωσης συνοδεύεται από ασαφή ορισμό αλλά και υποκειμενικότητα αρκετές φορές ανάλογα με τον επιστημονικό κλάδο, την μεθοδολογία ή τον στόχο για την παρακολούθηση του φαινομένου. Από την πλευρά της τηλεπισκόπησης διαχρονικά έχει υπάρξει μια πληθώρα μεθοδολογιών για την παρακολούθηση της αστικής εξάπλωσης (Bhatta et al., 2010). Μεθοδολογίες οι οποίες έχουν την απαρχή τους στην οικολογία τοπίου (landscape ecology) και σε ευρύτερες τεχνικές (spatial metrics) αναγνώρισης μοτίβων, δομών και μεταβολών στο αστικό τοπίο (π.χ Sudhira et al., 2004, Esbah et al., 2005, Ji et al., 2006, Ji, 2008, Triantakoustantis και Stathakis, 2015, Aithal et al., 2017, Magidi και Ahmed, 2018).

Τα νυχτερινά φώτα έρχονται να προσθέσουν μια ακόμη μεταβλητή στην παρακολούθηση της αστικής εξάπλωσης και του αστικού τοπίου γενικότερα. Οι Liu και Tang (2017) μελέτησαν τον φαινόμενο της αστικής εξάπλωσης με την συνδρομή των νυχτερινών φώτων DMSP/OLS και τον υπολογισμό δεικτών σε συγκριτική βάση μεταξύ διαφορετικών μητροπολιτικών περιοχών της Κίνας για την περίοδο 2000-2010. Η χωρική συνέχεια των

νυχτερινών φώτων χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο για τον καθορισμό των ορίων των μητροπολιτικών περιοχών. Ο υπολογισμός των δεικτών απέδειξε ότι η αστική εξάπλωση είναι πιο έντονη στις μητροπολιτικές περιοχές της βόρειας Κίνας. Ταυτόχρονα τονίζονται και οι αδυναμίες των δεδομένων DMSP/OLS όπως ο κορεσμός, η διαφοροποίηση του βαθμού αντιπροσώπευσης των φώτων με την αστική εξάπλωση ανά περιοχή και έτος και η αδυναμία περιγραφής της «υφής» της αστικής εξάπλωσης όπως μίξη χρήσεων γης και αστικών λειτουργιών.

Οι Liu et al. (2012) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για την διόρθωση των προβλημάτων που παρατηρούνται στα δεδομένα “Stable Lights” DMSP/OLS από πολλαπλές λήψεις από διαφορετικά έτη και δορυφόρους. Στόχος είναι να εξασφαλίσουν ομοιογένεια, συνέχεια και συγκρισιμότητα στα δεδομένα για να καταγράψουν την δυναμική της αστικής εξάπλωσης στην Κίνα από το 1992 ως το 2008. Οι Sutton (2003) προτείνουν μια διαφορετική εκδοχή της έννοιας της αστικής εξάπλωσης που είναι σταθμισμένη με τον συνολικό πληθυσμό ανά περιοχή. Στόχος είναι η αξιόπιστη σύγκριση της αστικής εξάπλωσης σε περιοχές με διαφορετικό βαθμό αστικοποίησης και η δημιουργία ενός δείκτη κατά κεφαλήν εδαφικής «κατανάλωσης». Χρησιμοποιούν τα νυχτερινά φώτα DMSP/OLS ως αντικειμενικό κριτήριο για τον προσδιορισμό της έκτασης αστικών περιοχών με πληθυσμό > 50.000 κατοίκους.

Οι Zhou et al. (2015) χαρτογράφησαν σε παγκόσμια κλίμακα για το 2000 την έκταση των αστικών περιοχών μέσω των νυχτερινών φώτων DMSP/OLS αναπτύσσοντας μια μεθοδολογία ικανή να αποδώσει παγκόσμια χρονοσειρά των αστικών περιοχών για περαιτέρω χρονική ανάλυση. Υπολογίστηκε ότι οι αστικές περιοχές παγκοσμίως καταλαμβάνουν περίπου το 0,5 % της ξηράς, ποσοστό το οποίο διαφοροποιείται έντονα σε περιφερειακό επίπεδο από 0,1 % στην Ωκεανία ως 2,3 % στην Ευρώπη ενώ σε επίπεδο χώρας, η έκταση των αστικών περιοχών ποικίλουν από 0,01 % ως 10 %. Επίσης προκύπτει ότι η αστικοποίηση ως προς την χωρική κατανομή ταυτίζεται με την παγκόσμια γεωγραφική κατανομή της ξηράς.

Η επαρκής χρονοσειρά των νυχτερινών φώτων DMSP/OLS (1992-2013) προσφέρει το πλεονέκτημα στην επιστημονική κοινότητα να την χρησιμοποιήσουν για την πρόβλεψη της αστικής εξάπλωσης και του βαθμού αστικοποίησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η χρήση γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης για την πρόβλεψη των τιμών των νυχτερινών φώτων από τον Stathakis (2016) για την Αθήνα και το Μιλάνο με την χρήση διαβαθμο-

νομημένου προϊόντος “Stable Lights” DMSP/OLS. Οι Hadjipetrou και Stathakis (2019), πάλι με δεδομένα DMSP/OLS, μελέτησαν την αστικοποίηση στην Κύπρο για να καταλήξουν στο συμπέρασμα της ισοκατανομής αυτής στα αστικά κέντρα και να αναδείξουν την χρησιμότητα των δεδομένων ως ερμηνευτικά εργαλεία των χωρικών προτύπων και των τάσεων της αστικοποίησης στο νησί.

Οι πόλεις εξαπλώνονται χωρικά κάτω από την έντονη πληθυσμιακή πίεση. Έχει παρατηρηθεί ότι οι ρυθμοί αυτοί είναι πιο έντονοι περιφερειακά του αστικού πυρήνα. Ωστόσο έχουν παρατηρηθεί και περιπτώσεις όπου η χωρική αστική εξάπλωση να μην συνοδεύεται από την αντίστοιχη πληθυσμιακή αύξηση στον περιαστικό χώρο (Terando et al., 2014). Η αστική διάχυση αυξάνει την διασυνδεσιμότητα και δικτύωση του αστικού περιβάλλοντος αλλά ταυτόχρονα κατακερματίζει τα φυσικά οικοσυστήματα και ασκεί έντονες περιβαλλοντικές πιέσεις σε αυτά όπως ρύπανση των υδατικών πόρων, διαταραχή στην τροφική αλυσίδα και στο μικροκλίμα της περιοχής. Επιπλέον, υπό την αστική εξάπλωση, η πανίδα εξωθείται σε μετακίνηση προς διαφορετικά περιβάλλοντα αδυνατώντας να προσαρμοστεί, ιδιαίτερα με τις συνθήκες της τρέχουσας κλιματικής αλλαγής. Κατά συνέπεια, η εκτίμηση της έκτασης και του μοτίβου της μελλοντικής αστικής εξάπλωσης είναι σημαντική μεταβλητή για την χάραξη στρατηγικής και σχεδιασμού για τους διαχειριστές φυσικών πόρων και τους χωροτάκτες/πολεοδόμους (Terando et al., 2014). Η χάραξη οποιαδήποτε χωρικής πολιτικής για το μέλλον εμπεριέχει την αναγκαιότητα της πρόβλεψης τόσο του αστικού πληθυσμού όσο και της χωρικής έκτασης της εξάπλωσης του αστικού ιστού.

Το μοντέλο προσομοίωσης αστικής εξάπλωσης Slope, Land use, Exclusion, Urban extension, Transportation and Hillshade (SLEUTH) έχει το προτέρημα να αποτυπώνει την χωρική έκταση και τα πρότυπα χωρικής εξάπλωσης και να συμπληρώνει μοντέλα προσομοίωσης που στηρίζονται αυστηρά στην μεταβολή του αστικού πληθυσμού (Terando et al., 2014).

Αρκετές εφαρμογές του μοντέλου SLEUTH, και κατά προέκταση των κυψελοειδών αυτομάτων, έχουν αναδείξει την αξία τους στην πρόβλεψη/προσομοίωση της αστικής διάχυσης. Οι Terando et al. (2014) προσομοίωσαν την αστική εξάπλωση για τις νοτιανατολικές ΗΠΑ μέχρι το 2060 χρησιμοποιώντας το μοντέλο SLEUTH, όπου το αποτέλεσμα της μελλοντικής εξάπλωσης είναι σε ταύτιση και συνέχεια αντίστοιχης συμπεριφοράς στο παρελθόν. Επιπλέον, οι Bihanta et al. (2015) έκαναν προσομοίωση της μελλοντικής αστικής εξάπλωσης από το 2010 ως το 2050 για το Ισφαχάν, υπό την πίεση της τρέχουσας οικι-

στικής ανάπτυξης και πληθυσμιακής αύξησης της πόλης. Για την βαθμονόμηση επέλεξαν ιστορικά δεδομένα από Landsat Multispectral Scanner (MSS) και Thematic Mapper (TM) για το 1976, 1990, 2001 και 2010 και χρησιμοποίησαν μεθόδους επιβλεπόμενης ταξινόμησης των δορυφορικών εικόνων για να εξάγουν τα απαραίτητα θεματικά επίπεδα (Slope, Land use, Exclusion, Urban extent, Transportation and Hillshade). Έγινε εφαρμογή δύο σεναρίων. Στο πρώτο διατηρώντας την ιστορική τάση της αστικής εξάπλωσης και στο δεύτερο, πιο συντηρητικό, με την υπόθεση ότι θα επιβληθούν περιοριστικές πολιτικές στην εξάπλωση και θα υπάρχει έλλειψη γης για δόμηση. Στο Ισφαχάν η τοπογραφία φαίνεται να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα σενάρια αστικής εξάπλωσης. Επιπλέον, ο υψηλός συντελεστής Spread που προέκυψε κατά την βαθμονόμηση, αποδεικνύει ότι η διάχυση είναι «οργανική» ή «διάχυση άκρων» (edge growth). Οι Pramanik και Stathakis (2016) χρησιμοποίησαν τον μοντέλο SLEUTH για την κατανόηση της αστικής δυναμικής και την πρόβλεψη της μελλοντικής εξάπλωσης της πόλης Ντάκα (Dhaka) στο Μπανγκλαντές. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου, μέχρι το 2030 αναμένεται να αστικοποιηθεί το 30 % της μητροπολιτικής περιοχής προς τις βόρειες και βορειοανατολικές παρυφές. Οι Yi και He (2009) συνδύασαν τα Σ.Γ.Π., την τηλεπισκόπηση (RS) και το μοντέλο SLEUTH για να αναλύσουν την αστική ανάπτυξη και να προτείνουν διαφορετικά σενάρια σχεδιασμού στο Πεκίνο. Η έρευνα επικεντρώθηκε στην πολλαπλή παραμετροποίηση του μοντέλου για την προσομοίωση της αστικής διάχυσης, την ανακατασκευή και πρόβλεψη της αστικοποίησης του Πεκίνου και την ανάδειξη των αιτιών και των συνεπειών αυτών των σεναρίων αστικοποίησης.

Τα ανθρωπογενή νυχτερινά φώτα εκτός από έναν αξιόλογο δείκτη για την παρακολούθηση και εκτίμηση την ανθρώπινης δραστηριότητας στον χώρο είναι ταυτόχρονα και μια εστία περιβαλλοντικής επιβάρυνσης καθώς από αυτά δημιουργείται το φαινόμενο της φωτορύπανσης.

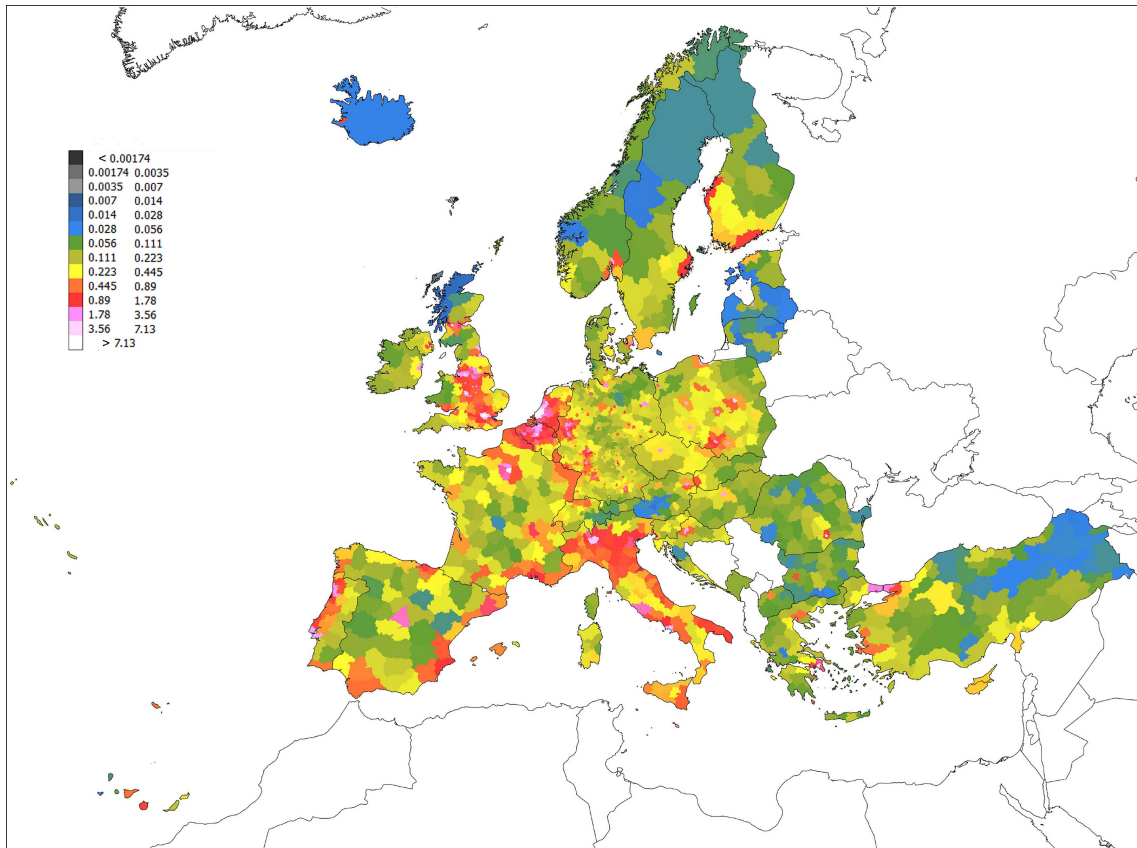
Όταν ο Thomas Edison, κάπου κοντά στα 1880, δοκίμαζε τα πειράματά του και ανακάλυπτε τον λαμπτήρα πυρακτώσεως για να ξεκινήσει η φρενήρης διάχυση του ηλεκτρικού ρεύματος ανά τον κόσμο, δεν έγινε αντιληπτό ότι τα αναμφισβήτητα οφέλη του ηλεκτρισμού θα συνοδεύονταν από έναν αντισταθμιστικό ρόλο με δυσμενείς συνέπειες στο περιβάλλον και τον άνθρωπο.

Πρώτοι οι αστρονόμοι άρχισαν να θέτουν το ζήτημα της φωτορύπανσης δεδομένου των δυσκολιών που αντιμετώπιζαν στην παρατήρηση των αστρικών σωμάτων και την

χωροθέτηση νέων παρατηρητηρίων σε περιοχές με σκοτεινό ουρανό (Riegel, 1973).

Τα δεδομένα νυχτερινών φώτων, με την παγκόσμια κάλυψη και την συχνότητα που διανέμονται τα δεδομένα τους, έχουν χρησιμοποιηθεί για την μελέτη της φωτορύπανσης. Οι πρώτες προσπάθειες χαρτογράφησης της κατανομής και της έντασης της φωτορύπανσης σε παγκόσμια κλίμακα με νυχτερινά φώτα ξεκίνησαν με την εκμετάλλευση των δεδομένων DMSP/OLS. Οι Cinzano et al. (2001) παρουσίασαν τον πρώτο παγκόσμιο άτλαντα (World Atlas of Artificial Night Sky Brightness) τεχνητής φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού στο ζενίθ στο επίπεδο της θάλασσας. Σύμφωνα με τον άτλαντα αυτό σχεδόν τα δύο τρίτα του Παγκόσμιου Πληθυσμού και 99 % του πληθυσμού στις ΗΠΑ και την Ευρωπαϊκή Ένωση ζούν σε συνθήκες έντονου φωτισμού, σε επίπεδα πάνω από τα επιτρεπτά όρια βάσει των οποίων χαρακτηρίζεται η φωτορύπανση. Ένα εξίσου ηχηρό ποσοστό πληθυσμού έχει χάσει την ορατότητα δια γυμνού οφθαλμού στον γαλαξία (“Milky Way”) ενώ ένα άλλο επίσης σημαντικό ποσοστό έχει σταματήσει την παρατήρηση του νυχτερινού ουρανού με όργανα λόγω της φωτορύπανσης.

Οι Kyba et al. (2017), ερευνώντας την μετάβαση σε νέες τεχνολογίες φωτισμού (Light Emitting Diode (LED)) σε παγκόσμιο επίπεδο και με την χρήση δεδομένων snpp-VIIRS αποκάλυψαν ότι για την περίοδο 2012-2016 τόσο οι φωτιζόμενες περιοχές όσο και η ακτινοβολία τους αυξήθηκαν στις περισσότερες χώρες. Οι Falchi et al. (2019) συνδυάζοντας δεδομένα snpp-VIIRS, πληθυσμιακά και εισοδηματικά δεδομένα δημιούργησαν ένα κατάλογο φωτορύπανσης που αφορά τις πολιτείες των ΗΠΑ και τις στατιστικές μονάδες Nomenclature of territorial units for statistics (NUTS) 2 & NUTS 3 της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Παρατηρήθηκαν ασύμμετρες ανισοκατανομές και μεγάλες αποκλίσεις σε περιφερειακό επίπεδο συγκριτικά με το μέγεθος της φωτορύπανσης. Έτσι για παράδειγμα, στο Delft en Westland της Ολλανδίας σημειώθηκαν επίπεδα φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού 7.000 υψηλότερα από εκείνα του Eilean Siar, στο Ηνωμένο Βασίλειο (βλ. Χάρτη 1)



Χάρτης 1: Μέση τεχνητή φωτεινότητα νυχτερινού ουρανού στο ζενίθ (mcd/m<sup>2</sup>) για τα NUTS3. (Πηγή: Falchi et al., 2019).

Επιπλέον, τα νυχτερινά φώτα snpp-VIIRS αξιοποιήθηκαν και για έρευνες εθνικής ή τοπικής κλίμακας για το φαινόμενο της φωτορύπανσης (Duriscoe et al., 2018· Kyba et al., 2017a· Nurbandi et al., 2016)

Η διατάραξη του φυσιολογικού 24-ωρου κύκλου της εναλλαγής του φωτός και του σκοταδιού έχει αρνητικές συνέπειες στην χλωρίδα και την πανίδα, στους κερκαδικούς ρυθμούς, την έκκριση μελατονίνης (Grubisic et al., 2019· Kerenyi et al., 1990), τον μεταβολισμό, την ανάπτυξη, την συμπεριφορά και εν τέλει την υγεία των έμβιων οργανισμών (Chepesiuk, 2009· Garcia-Saenz et al., 2018· Kirschbaum, 2003· Kloog et al., 2009· Navara και Nelson, 2007· Pauley, 2004· Pawson και Bader, 2014). Οι δε οικολογικές συνέπειες της φωτορύπανσης είναι ακόμη πιο επιβαρυντικές σε ειδικές ατμοσφαιρικές συνθήκες (νεφελώδεις νύχτες) (Kyba et al., 2012· Kyba et al., 2011), δεδομένου ότι η φωτεινότητα του ουρανού πολλαπλασιάζεται. Το περιβαλλοντικό κόστος είναι άμεσο αφού η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για τον ηλεκτροφωτισμό συμβάλλει στις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα. Σύμφωνα με υπολογισμούς στις ΗΠΑ η φωτορύπανση στοιχίζει 6,9 δισ. δολάρια το έτος και προκαλεί 66 t<sup>3</sup> CO<sup>2</sup> (Gallaway et al.,

2010). Και ενώ μέσω της τεχνολογίας (λαμπτήρες compact fluorescent lamp (CFL), light-emitting diode (LED), organic light-emitting diode (OLED)), δίνεται η ευκαιρία να μειωθεί το ενεργειακό αποτύπωμα του ηλεκτροφωτισμού, η μειωμένη κατανάλωση οδηγεί σε αντιστροφή συμπεριφορά (“rebound effect”) και εν τέλει σε αύξηση των επιπέδων νυχτερινού φωτισμού και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (Hölker et al., 2010).

Επιπλέον, ο νυχτερινός σκοτεινός ουρανός είναι ένα κοινό αγαθό από το οποίο διαχρονικά απορρέουν μια σειρά πολιτισμικών και θρησκευτικών εκφάνσεων. Το γεγονός ότι πλέον ο σκοτεινός νυχτερινός ουρανός δεν υφίσταται στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες και είναι ένα αγαθό περιορισμένο πλέον σε παγκόσμια κλίμακα, τότε το μέγεθος του προβλήματος από αισθητική σκοπιά είναι αρκετά σοβαρό. Αλλά και σε περιπτώσεις όπου ο σκοτεινός ουρανός λειτουργεί ως τουριστικός πόλος έλξης, κυρίως σε λιγότερο ανεπτυγμένες περιοχές, το πλεονέκτημα αυτό φαίνεται να χάνεται σταδιακά με ότι αυτό συνεπάγεται για τις τοπικές οικονομίες. Η εξάπλωση της φωτορύπανσης απειλεί υπό αυτή την έννοια και αυτόν τον πόρο, μια παράμετρος η οποία αγνοείται συχνά από τους οικονομολόγους (Gallaway, 2010).

Το πρόβλημα της φωτορύπανσης, ανάλογα την κλίμακα και την οπτική, μπορεί να έχει τοπικές, περιφερειακές ή παγκόσμιες διαστάσεις. Έτσι για παράδειγμα ο υπερβολικός φωτισμός ενός γηπέδου μπορεί να αποτελεί πρόβλημα για τις γειτονικές κατοικίες, ο τεχνητά φωτεινός ουράνιος θόλος (skyglow) μιας πόλης μπορεί να είναι ορατός από πολλά χιλιόμετρα μακριά (περιφερειακή κλίμακα) ενώ τέλος παγκόσμιες είναι οι διαστάσεις του προβλήματος όταν η έρευνα επικεντρώνεται στις ευρύτερες περιβαλλοντικές συνέπειες, στην κατανάλωση ενέργειας και την άγρια ζωή. Υπό το πρίσμα αυτό, πολιτικές τοπικής κλίμακας για την μείωση της φωτορύπανσης και τον περιορισμό του υπέρμετρου φωτισμού έχουν παγκόσμια θετική επίπτωση. Και ενώ πλέον με την σύγχρονη τεχνολογία είναι σχετικά εύκολη η μέτρηση της φωτορύπανσης (Duriscoe et al., 2007· Rabaza et al., 2010), ακόμα και σε παγκόσμια κλίμακα (Cinzano et al., 2001), αντιθέτως οι συνέπειές της είναι πιο δυσδιάκριτες και δυσκολότερα μετρήσιμες.

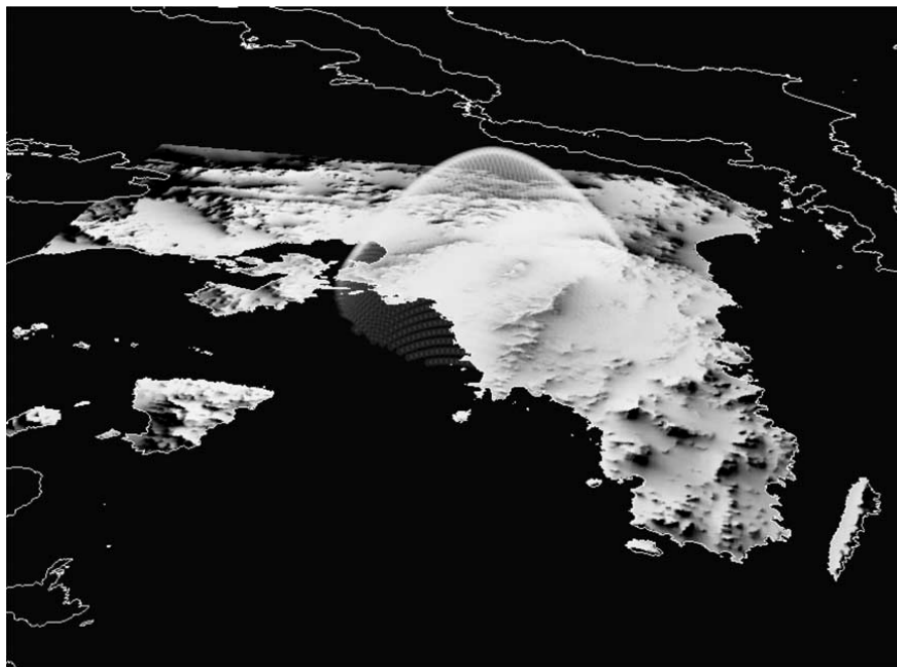
Εξαιτίας της έκτασης και των συνεπειών του φαινομένου της φωτορύπανσης αναγνωρίζεται η αναγκαιότητα για την διασφάλιση πιο σκοτεινού νυχτερινού περιβάλλοντος στο αστικό και όχι μόνο τοπικό (del Castillo et al., 2003· Kaplan, 2003· Sanhueza και Santander, 2003· Smith, 2003· Wainscoat, 2003). Γι’ αυτό τον λόγο έχουν γίνει προσπάθειες για την ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον εντοπισμό περιοχών ηρεμίας (tranquillity spaces) που



εκτός από τον περιορισμένο θόρυβο και την χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα να έχουν και χαμηλή έκθεση στην φωτορύπανση (Pafi et al., 2018· Votsi et al., 2017).

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια (κινητά τηλέφωνα, διαδίκτυο, σύστημα γεωεντοπισμού GPS) έχουν επιτρέψει την ανάπτυξη εγχειρημάτων πληθοπορισμού για την έρευνα της φωτορύπανσης (Kyba et al., 2013b). Η καμπάνια “GLOBE at Night” τρέχει από το 2006 και στηρίζεται στην παγκόσμια συμμετοχή των πολιτών-επιστημόνων (citizen scientists) για την μέτρηση της φωτορύπανσης και το φαινόμενο του φωτεινού ουράνιου θόλου (skyglow) σε τοπικό επίπεδο.

Το διογκούμενο πρόβλημα της φωτορύπανσης, με τις έντονες συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία, τα οικοσυστήματα και την ομαλή διαβίωση των εμβίων όντων αποτέλεσε την αφορμή για την πρόταση ενός δείκτη εκτίμησης της άμεσης φωτορύπανσης (από άμεση έκθεση στην πηγή του φωτός) με την αξιοποίηση των δεδομένων νυχτερινών φώτων. Εκτός από την άμεση έκθεση στην φωτεινή πηγή από έναν παρατηρητή υπάρχει και η έμμεση έκθεση στην φωτεινότητα του ουράνιου θόλου. Στην τρέχουσα διατριβή δεν ερευνάται η έμμεση έκθεση στην φωτορύπανση. Σχετική έρευνα για την έμμεση φωτορύπανση στην ελληνική βιβλιογραφία έχει γίνει από τους Chalkias et al. (2006) για την Αττική (βλ. Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Έμμεση φωτορύπανση στην Αττική (καλοκαίρι 2000). Όσο πιο ανοικτή η διαβάθμιση της φωτεινότητας τόσο πιο μεγάλη η έκθεση στην φωτορύπανση. (Πηγή: Chalkias et al., 2006).

### 1.3 ΣΤΟΧΟΙ-ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ

Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο τα νυχτερινά φώτα χρησιμοποιήθηκαν εκτεταμένα στην έρευνα. Ωστόσο υπάρχουν περαιτέρω δυνατότητες για την εκμετάλλευση των νυχτερινών φώτων που δεν έχουν εξαντληθεί ακόμα, είτε αυτές αφορούν την αναβάθμιση των ίδιων των δεδομένων είτε αφορούν την επέκταση και εξειδίκευση της εφαρμογής τους στα αστικά φαινόμενα. Αυτές οι ελλείψεις (ή ερευνητικές ευκαιρίες) για την περαιτέρω αξιοποίηση των νυχτερινών φώτων αναδεικνύουν μια σειρά ερευνητικών ερωτημάτων.

Από την επισκόπηση της βιβλιογραφίας προκύπτει ότι τα καθημερινά δεδομένα snrrp-VIIRS δεν έχουν προς το παρόν εκτεταμένη εφαρμογή στα καθημερινά αστικά φαινόμενα. Αυτό κυρίως γιατί η προεπεξεργασία τους και η δημιουργία μιας αξιοποιήσιμης χρονοσειράς είναι εξαιρετικά απαιτητική διαδικασία ιδιαίτερα όταν δεν έχουν επιλυθεί σημαντικά προβλήματα που επηρεάζουν την ποιότητά τους (όπως η επίδραση της σεληνιακής ακτινοβολίας). Κατά συνέπεια προκύπτει το ερευνητικό ερώτημα αν τα ημερήσια δεδομένα snrrp-VIIRS μπορούν να βελτιωθούν ώστε να έχουν εφαρμογή στην μελέτη βραχυχρόνιων αστικών λειτουργιών (E1).

Για τα νυχτερινά φώτα DMSP/OLS έχουν προταθεί μεθοδολογίες για την βελτίωση τους. Από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους είναι η μέθοδος VANUI (Zhang et al., 2013) η οποία όμως έχει μειονεκτήματα και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής για την αναβάθμισή της. Συνδυασμός της μεθόδου με άλλα δεδομένα έχει γίνει (Land Surface Temperature (LST)) (Zhang και Li, 2018) αλλά όχι με δεδομένα Synthetic-aperture radar (SAR). Επομένως, είναι δυνατόν να βελτιωθούν περαιτέρω τα δεδομένα νυχτερινών φώτων DMSP/OLS ώστε να αποδίδεται επαρκώς ο αστικός πυρήνας και οι παραλλαγές της αστικής δραστηριότητας στον αστικό χώρο (E2);

Αλλά και στα αστικά φαινόμενα η εκμετάλλευση των νυχτερινών φώτων για την πρόβλεψη της αστικής εξάπλωσης και της αστικής δραστηριότητας δεν είναι πλήρης. Ο συνδυασμός των δεδομένων νυχτερινών φώτων με διαδεδομένα και επιτυχημένα μοντέλα αστικής εξάπλωσης όπως το μοντέλο SLEUTH δεν έχει επιχειρηθεί ακόμα. Μπορεί λοιπόν να προβλεφθεί η αστική εξάπλωση στον χώρο με βάση τα νυχτερινά φώτα (E3); Είναι εφικτό να προβλεφθεί η ένταση της αστικής δραστηριότητας μέσω των νυχτερινών φώτων (E4);

Όμως πέρα από την εφαρμογή στα αστικά φαινόμενα εξετάζεται και η χρηστικότητα

των νυχτερινών φώτων σε φαινόμενα με περιβαλλοντικές διαστάσεις. Μπορούν τα δεδομένα νυχτερινών φώτων, λόγω της ιδιαίτερης συσχέτισης με το φαινόμενο της φωτορύπανσης, να συμβάλλουν στην εκτίμηση της (E5);

Τα νυχτερινά φώτα δίνουν την δυνατότητα, ως υποκατάστατη μεταβλητή, για την εκτίμηση οικονομικών μεγεθών. Όμως, από την έρευνα της βιβλιογραφίας, προκύπτει ότι δεν έχει γίνει εκτίμηση οικονομικών μεγεθών σε πολύ αναλυτική χωρική και χρονική κλίμακα. Μπορούν να εκτιμηθούν οικονομικές μεταβλητές σε λεπτομερές χωρικό και χρονικό επίπεδο με την χρήση νυχτερινών φώτων (E6); Είναι δυνατόν τα νυχτερινά φώτα να μετρήσουν την εποχικότητα του πληθυσμού και γενικότερα της αστικής δραστηριότητας (E7);

Επίσης, είναι γνωστό ότι τα νυχτερινά φώτα έχουν χρησιμοποιηθεί για την αποτίμηση των συνεπειών εκτάκτων γεγονότων, κυρίως πολεμικών συρράξεων, θρησκευτικών εορτών ή φυσικών καταστροφών. Όμως η κρίση της πανδημίας του κορωνοϊού αποτελεί μια πρωτόγνωρη, μοναδική και σπάνια ευκαιρία για την εξέταση της επίδρασης των πανδημιών στην αστική δραστηριότητα. Από την βιβλιογραφία επιβεβαιώνεται ότι οι σχετικές έρευνες είναι πολύ λίγες (Bustamante-Calabria et al., 2020· Lan et al., 2021· Liu et al., 2020) και δεν αφορούν την ελληνική αστική πραγματικότητα. Είναι εφικτό λοιπόν να καταγραφεί μέσω των νυχτερινών φώτων η επίδραση εκτάκτων γεγονότων στην αστική δραστηριότητα (E8);

Βέβαια η αστική δραστηριότητα πέρα από την επίδραση εκτάκτων συνθηκών ακολουθεί μοτίβα και πρότυπα κατά την διάρκεια τόσο του έτους όσο και της εβδομάδας. Προκύπτει επομένως το ερευνητικό ερώτημα αν μπορεί να αποδοθεί η λειτουργία της πόλης και η διακύμανση της αστικής δραστηριότητας με ημερήσια φώτα (E9); Τέλος, η χρήση εναλλακτικών πηγών δεδομένων νυχτερινών φώτων μπορεί να αναδείξει τα προβλήματα και να συνεισφέρει στην βελτίωση των καθιερωμένων συνόλων δεδομένων όσον αφορά την εφαρμογή τους στον αστικό χώρο (E10);

Με βάση τις ελλείψεις που προκύπτουν από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας προκύπτει μια σειρά στόχων που τίθενται για τον εμπλουτισμό των εφαρμογών των νυχτερινών φώτων στα αστικά φαινόμενα. Στόχος της τρέχουσας διατριβής είναι η ανάλυση της αστικής δραστηριότητας των ελληνικών πόλεων μέσω της αξιοποίησης δορυφορικών δεδομένων νυχτερινών φώτων. Πιο αναλυτικά, η έρευνα στοχεύει:

- στην βελτίωση των νυχτερινών φώτων DMSP/OLS και snpp-VIIRS ώστε να ανα-

βαθμιστεί η χρηστικότητα και η εφαρμογή τους στα αστικά φαινόμενα,

- να αναλυθεί η εποχικότητα της αστικής δραστηριότητας,
- να προβλεφθούν οικονομικά μεγέθη με την χρήση δεδομένων νυχτερινών φώτων,
- να εκτιμηθεί η μελλοντική επέκταση/διάχυση των ελληνικών πόλεων,
- να αναλυθούν τα πρότυπα μετακίνησης σε επίπεδο εβδομάδας και κατά την διάρκεια του έτους,
- να αποτιμηθούν οι επιδράσεις ειδικών φαινομένων (π.χ. εορτών, έκτακτων συνθηκών) στην λειτουργία της πόλης.
- να καταγραφούν οι περιβαλλοντικές διαστάσεις της φωτορύπανσης.
- να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικές πηγές δεδομένων νυχτερινών φώτων για την αποτίμηση της επάρκειας των τυπικών και επικρατέστερων συνόλων δεδομένων (DMSP/OLS, snpp-VIIRS στα αστικά φαινόμενα).

Η επίτευξη των παραπάνω στόχων γίνεται με την ανάλυση των δεδομένων νυχτερινών φώτων.

Επομένως, στόχος της διατριβής είναι να αποδειχθεί ότι η ένταση των νυχτερινών φώτων αποτελεί επαρκή μεταβλητή για να περιγράψει την εποχικότητα της αστικής δραστηριότητας, την χωρική εξάπλωση του αστικού ιστού, την διακύμανση της αστικής λειτουργίας σε καθημερινό επίπεδο αλλά και ικανή να εκτιμήσει την περιβαλλοντική επιβάρυνση όπως αυτή εκφράζεται με όρους και μεγέθη φωτορύπανσης.

Γίνεται μια προσπάθεια για την αποτίμηση των νυχτερινών φώτων ως εργαλείο για την παρακολούθηση της επέκτασης και λειτουργίας του αστικού ιστού. Η διαχρονική παρακολούθηση τόσο της αστικής εξάπλωσης των ελληνικών πόλεων όσο και της λειτουργίας τους σε πολλαπλές χωροχρονικές κλίμακες, σε εποχιακή, εβδομαδιαία και καθημερινή βάση αλλά και σε έκτακτες συνθήκες και ειδικά γεγονότα.

Ειδικά για την έρευνα έκτακτων ή ασυνήθιστων γεγονότων, η κρίση της πανδημίας της COVID-19 που ξέσπασε το 2020, δίνει μια άριστη ευκαιρία και αφορμή να δοκιμαστούν τα νυχτερινά φώτα στην καταγραφή και εκτίμηση των συνεπειών του επιβαλλόμενου γενικού απαγορευτικού (lock down). Κατά συνέπεια, ερευνάται η επίπτωση του

γενικού απαγορευτικού (lockdown) που επιβλήθηκε λόγω της πανδημίας του κορωνοϊού (COVID-19) στην αστική δραστηριότητα σε λεπτομερή χωρική ανάλυση.

Για να εκπληρωθούν όμως οι παραπάνω στόχοι, η έρευνα αρχικά επικεντρώνεται στην εξασφάλιση της ποιοτικής αναβάθμισης των δεδομένων. Ξεκινώντας από την πλέον μακροχρόνια χρονοσειρά νυχτερινών δεδομένων, τα δεδομένα DMSP/OLS, προτείνεται αρχικά μια μεθοδολογία με δεδομένα SAR για την επίλυση ενός σημαντικού προβλήματος, του κορεσμού των δεδομένων στον αστικό πυρήνα. Παράλληλα, με την μεθοδολογία για την αντιμετώπιση του κορεσμού των τιμών στον αστικό πυρήνα δοκιμάζεται και η επέκταση της χρονοσειράς με μεθόδους πρόβλεψης (η οποία εκτείνεται από το 1992 ως το 2013). Αν και τα δεδομένα DMSP/OLS διαθέτουν επαρκή χρονοσειρά, τα προβλήματα τους (κορεσμός τιμών στον αστικό πυρήνα λόγω χαμηλού ραδιομετρικού εύρους καταγραφής, χαμηλή χωρική και χρονική ανάλυση, έλλειψη διαβαθμονόμησης) τα καθιστούν ακατάλληλα για πιο λεπτομερή έρευνα του αστικού τοπίου.

Το κενό αυτών έρχεται να καλύψει ο αισθητήρας snpp-VIIRS, με επαρκές ραδιομετρικό εύρος, υψηλότερη χωρική διακριτική ικανότητα και ικανοποιητικό χρονικό βήμα διάθεσης δεδομένων (καθημερινή βάση) (βλ. Πίνακα 2 για σύγκριση). Ωστόσο τα αδρά δεδομένα snpp-VIIRS (καθημερινής λήψης) απαιτούν ιδιαίτερη επεξεργασία για την ορθή τους χρήση. Στα κεφάλαια που ακολουθούν, στόχος είναι να αναπτυχθεί μια μεθοδολογία που θα συμβάλλει στην διόρθωση ενός από τους πιο διαστρεβλωτικούς παραγόντες της χρήσης των δεδομένων, της σεληνιακής ακτινοβολίας. Επίσης, χρησιμοποιούνται και φωτογραφίες από τον International Space Station (ISS) με στόχο να αναδειχθούν με εμπειρικό τρόπο οι αδυναμίες και οι περιορισμοί των προαναφερθέντων δεδομένων (DMSP/OLS και snpp-VIIRS).

Επιπλέον, στα πλαίσια της διατριβής επιχειρείται να διαπιστωθεί αν υπάρχει εποχικότητα στους δήμους της χώρας. Με τον όρο εποχικότητα εννοείται η περιοδική και προβλεπόμενη εποχική διακύμανση του πληθυσμού και της οικονομικής δραστηριότητας στην διάρκεια ενός έτους. Επηρεάζεται από παράγοντες όπως η ζήτηση (π.χ. η τουριστική κίνηση), τα καιρικά φαινόμενα και οι διεθνείς συνθήκες. Η εκτίμηση της εποχικότητας σε μια περιοχή συμβάλλει στον ορθό χωροταξικό και περιβαλλοντικό σχεδιασμό. Για τον λόγο αυτό εξετάζεται η διάρκεια της, εντοπίζεται ο μήνας με την μέγιστη δραστηριότητα και κατά πόσο διαφέρει αυτή από την τυπική αστική δραστηριότητα του έτους.

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε αναφορά στις υποθέσεις εργασίας και όπως διαπι-

στάθηκε μία από τις βασικές υποθέσεις εργασίας είναι ότι τα νυχτερινά φώτα έχουν σημαντική συσχέτιση με οικονομικές μεταβλητές. Κατά συνέπεια είναι εφικτό να λειτουργήσουν σαν δευτερογενής βοηθητική (proxy) μεταβλητή για την εκτίμηση ή πρόβλεψη οικονομικών μεγεθών. Οπότε ένας άλλος στόχος που απορρέει από αυτή την ιδιότητα είναι να υπολογίσουμε σε μηνιαία βάση το ΑΕΠ για όλες τις στατιστικές μονάδες NUTS 3 της Ελλάδας για την περίοδο Ιανουάριος 2014-Δεκέμβριος 2017. Κατά την προσπάθεια επίτευξης των στόχων της διατριβής προκύπτουν καινοτόμες μέθοδοι τόσο για την προεπεξεργασία όσο και για την διόρθωση των υφιστάμενων δεδομένων νυχτερινών φώτων.

Επιχειρείται η βελτίωση της χρονοσειρά DMSP/OLS με την χρήση δεδομένων θερμοκρασίας εδάφους (LST), του δείκτη βλάστησης Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) και δεδομένων SAR. Τα δεδομένα SAR είναι μια εναλλακτική πηγή για την απόδοση του αστικού τοπίου. Είναι τύπος συλλογής ενεργητικών δεδομένων όπου ένας αισθητήρας εκπέμπει την δική του ενέργεια και στην συνέχεια καταγράφει την ενέργεια που ανακλάται από την γη. Το σήμα που επιστρέφεται πίσω είναι ευαίσθητο στις γεωμετρικές δομές και στις διηλεκτρικές ιδιότητες της γήινης επιφάνειας και αποτυπώνει χαρακτηριστικά της όπως την τραχύτητα της, την υγρασία του εδάφους, τον κυματισμό της θάλασσας κ.α.

Όσον αφορά την προεπεξεργασία των δεδομένων snpp-VIIRS, προτείνεται μεθοδολογία για την διόρθωση των τιμών της ακτινοβολίας από την σεληνιακή ακτινοβολία. Οι τιμές της ακτινοβολίας των εν λόγω δεδομένων επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από την σεληνιακή λάμψη με αποτέλεσμα την ακαταλληλότητά τους για έρευνα σχετικά με τον αστικό χώρο. Η διαδικασία διόρθωσης είναι ιδιαίτερα καινοτόμα και χρήσιμη στην επιστημονική κοινότητα καθώς επιτρέπει την χρήση ημερήσιων δεδομένων αφού οι μέχρι τώρα προτεινόμενες από την βιβλιογραφία μέθοδοι είναι ιδιαίτερα σύνθετες και απαιτητικές σε συμπληρωματικά δεδομένα και μεθόδους φυσικών επιστημών.

Άλλη μια καινοτομία σχετικά με την έρευνα για την λειτουργία του αστικού χώρου, είναι η χρήση δεδομένων ημερήσιας βάσης (snpp-VIIRS). Οι έρευνες με βάση αυτή την σειρά δεδομένων είναι ελάχιστες, ενδεχομένως λόγω των απαιτούμενων διαδικασιών προεπεξεργασίας αυτών των δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά επιτρέπουν την ανάλυση προτύπων μετακίνησης (commuting patterns) ανά ημέρα εβδομάδας και Σαββατοκύριακων, την αποτύπωση της επίδρασης που επιφέρουν στην αστική λειτουργία έκτακτες συνθήκες και συμβάντα. Στις καινοτομίες της έρευνας μπορεί να θεωρηθεί η έρευνα των επιπτώσεων

στην αστική δραστηριότητα από το γενικό απαγορευτικό (lockdown) και την επέλαση της πανδημίας του κορωνοϊού (COVID-19) Ακόμα, πάλι με βάση τα δεδομένα snpp-VIIRS (μηνιαία σύνθετα) επιχειρείται η ανάλυση της εποχικότητας της αστικής λειτουργίας του ελληνικού χώρου. Στις καινοτομίες της έρευνας θεωρείται και η χρήση των εικόνων του ISS για την αποτίμηση της ακρίβειας των δεδομένων snpp-VIIRS.

## 2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ - ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν τα νυχτερινά δεδομένα στην τρέχουσα έρευνα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, είναι αναγκαίο να γίνει μια αναλυτική αναφορά στα διαθέσιμα προϊόντα και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του καθενός. Η σύγκριση των διαφόρων προϊόντων επιτρέπει να αξιολογήσουμε την καταλληλότητά τους ανάλογα τις ανάγκες της έρευνας και την χρήση του ανάλογου προϊόντος κάθε φορά. Ορισμένα από τα προϊόντα αυτά δεν διατίθενται δημόσια, άλλα απαιτούν οικονομικό κόστος πέρα από τους πόρους της έρευνας αλλά το κυριότερο είναι ότι κάθε προϊόν έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που το καθιστούν κατάλληλο ή ακατάλληλο ανάλογα το είδος της έρευνας. Το καθένα έχει αδυναμίες και περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά την διεξαγωγή της έρευνας και εφόσον είναι εφικτό να εξαλειφθούν. Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζονται τα βασικά προϊόντα/δεδομένα νυχτερινών φώτων.



## 2.1 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΝΥΧΤΕΡΙΝΩΝ ΦΩΤΩΝ

Πριν γίνει αναφορά στην προσφορά των δεδομένων νυχτερινών φώτων στην επιστήμη και την έρευνα θα προηγηθεί μια συνοπτική περιγραφή των τυπικών χαρακτηριστικών των βασικότερων δεδομένων νυχτερινών φώτων.

### 2.1.1 ΠΗΓΕΣ ΦΩΤΟΣ

Η ακτινοβολία του φωτός η οποία προσλαμβάνεται από τον αισθητήρα του δορυφόρου μπορεί να προέρχεται από διάφορες πηγές, οι οποίες είτε έχουν άμεση θέαση με τον αισθητήρα είτε το φως τους μπορεί να διαχέεται μέσω άλλων μέσων προς αυτόν (π.χ κτίρια, έδαφος).

Σύμφωνα με έρευνα για την φωτορύπανση (Kuechly et al., 2012) στο Βερολίνο, βρέθηκε ότι οι κυριότερες, αναγνωρίσιμες πηγές εκπομπής φωτός προς το ζενίθ είναι το οδικό δίκτυο (32 %), οι βιομηχανικές περιοχές (16 %), οι περιοχές υπηρεσιών κοινής ωφελείας (10 %), τα οικοδομικά τετράγωνα (8 %), το κέντρο της πόλης (6 %), τα αεροδρόμια (4 %) και τα σημεία εφοδιασμού και οι εγκαταστάσεις διαχείρισης απορριμμάτων (4 %).

Σύμφωνα με τους Cinzano et al. (2001) ως *φωτορύπανση* ορίζεται «η τροποποίηση των επιπέδων του φυσικού φωτός στο νυχτερινό περιβάλλον από ανθρωπογενείς πηγές φωτός».

Σημαντικό ρόλο στην καταγραφή της ακτινοβολίας διαδραματίζει η γωνία απόκλισης λήψης ( $\theta$ ) από το ναδίρ (off nadir scan angle). Οι αισθητήρες λήψης των δορυφόρων δεν σαρώνουν κάθετα στο ναδίρ αλλά υπό γωνία σε σχέση με αυτό. Η γωνία  $\theta$  είναι  $0^\circ$  όταν η λήψη γίνεται στο ναδίρ (κατακόρυφα προς τα κάτω) και αυξάνεται καθώς απομακρύνεται από αυτό.

Όσο η γωνία  $\theta$  αυξάνεται από το μηδέν, το φως διέρχεται περισσότερο μέσα από την ατμόσφαιρα και τις αέριες μάζες της με αποτέλεσμα αυτή η διέλευση να επηρεάζει αφενός το οπτικό βάθος και αφετέρου να μετατοπίζει την φασματική θέση του σήματος. Μεγάλες γωνίες λήψεως από το ναδίρ καταγράφουν ακτινοβολία με μεγαλύτερη ευαισθησία στα ατμοσφαιρικά αέρια και σε αντανάκλασεις από νέφη (Jensen, 2016). Έτσι οι πηγές φωτός μπορεί να έχουν διαφορετικό προφίλ εκπομπής ακτινοβολίας, και ενώ μπορεί να συμβάλουν στο φαινόμενο του φωτεινού θόλου (skyglow) μέσω της οριζόντιας διάχυσης της ακτινοβολίας, μπορεί ωστόσο να είναι σχεδόν αόρατες από ένα όργανο με κάθετη

λήψη στο ναδίρ (Kyba et al., 2014). Φωτεινός ουράνιος θόλος είναι το φαινόμενο κατά το οποίο το φως διαχέεται προς τον νυχτερινό ουρανό από τις φωτεινές πηγές, συνήθως ανθρωπογενείς, και συμβάλλει στο φαινόμενο της φωτορύπανσης. Η παραπάνω διατύπωση για την γωνία λήψης είναι εξαιρετικά κρίσιμη σε μία έρευνα συγκριτικής θεώρησης η οποία αξιοποιεί χρονοσειρά δεδομένων νυχτερινών φώτων βραχείας χρονικής λήψης (π.χ. Daily snpp-VIIRS Black Marble) δεδομένου ότι η ίδια πηγή φωτός καταγράφεται και αποδίδεται με διαφορετικό τρόπο σε κάθε λήψη από τον αισθητήρα.

Στην συνέχεια περιγράφονται οι κυριότερες πηγές δεδομένων νυχτερινών φώτων, τα χαρακτηριστικά τους καθώς και ποιές από αυτές χρησιμοποιήθηκαν στην τρέχουσα διατριβή.

### *2.1.2 Defense Meteorological Satellite Program Operational Line Scanner (DMSP/OLS)*

Το πρόγραμμα DMSP/OLS ξεκίνησε την αποστολή του στα μέσα της δεκαετίας το '60 αρχικά για στρατιωτικούς σκοπούς. Από τα μέσα της δεκαετίας του '70 η υπηρεσία Air Force Defense Meteorological Satellite Program έχει θέσει σε τροχιά δορυφορικές πλατφόρμες πολικής τροχιάς με αισθητήρες παρακολούθησης νεφών, ικανές να ανιχνεύουν νέφη σε δύο φασματικές μπάντες: στο ορατό κοντινό υπέρυθρο (VNIR) και στο θερμικό υπέρυθρο (TIR). Το πρόγραμμα ξεκίνησε με το Sensor Aerospace Vehicle Electronics Package που τροchioδρόμησε από το 1970 ως το 1976.

Το 1973 (Dickinson et al., 1974) το σύστημα έγινε διαθέσιμο για δημόσια χρήση και τα δεδομένα είναι διαθέσιμα για λήψη από το διαδίκτυο από το 1992. Ο αρχικός σχεδιασμός στόχο είχε την καταγραφή νυχτερινών νεφών από το φως της σεληνιακής ακτινοβολίας και δεν προέβλεπε τον εντοπισμό αστικού ηλεκτρικού φωτός. Η ιδιότητα αυτή ανακαλύφθηκε στην πορεία όταν άρχισαν να μεταδίδονται τα πρώτα δεδομένα.

Ως το 2013, εννέα δορυφόροι (F10-F18) έφεραν το ραδιόμετρο περιοδικής σάρωσης DMSP/OLS και συνέλεξαν εικόνες νυχτός. Παρείχαν διαφορετικά σύνολα δεδομένων, από ανεπεξέργαστα ημερήσια δεδομένα ως χρονοσειρές δεδομένων σταθερού φωτός (Huang et al., 2014). Οι δορυφόροι διαγράφουν τροχιά ηλιοσύγχρονη σε μέσο ύψος 833 km (από την επιφάνεια της γης) και διέρχονται από δεδομένο σημείο της γης σε συγκεκριμένη τοπική ώρα (20:30-21:30). Ο κάθε δορυφόρος (από την σειρά Block-5D) παρέχει παγκόσμια κάλυψη νυχτερινών δεδομένων όλο το 24-ώρο σε ένα σύνολο από 14 τροχιές.

Η καταγραφή της τροχιάς των δορυφόρων καλύπτει το πλήρες γεωγραφικό μήκος του πλανήτη και μια ζώνη από  $-65^\circ$  ως  $75^\circ$  γεωγραφικού πλάτους.

Η χωρική ανάλυση των 2,8 km σε πλήρη λειτουργία και 0,56 km σε βέλτιστη, με μια λωρίδα σάρωσης 3.000 km, καθώς και η υψηλή αντίθεση σε φωτεινές και σκοτεινές περιοχές, καθιστά ικανή την συνοπτική κάλυψη μεγάλων περιοχών και την αναγνώριση ανθρώπινων δραστηριοτήτων (Amaral et al., 2006).

Παρόλη την αδιαμφισβήτητη αξία των δεδομένων DMSP/OLS Stable Lights στη μελέτη των αστικών περιοχών (επαρκή χρονοσειρά, επιπλέον προεπεξεργασία για την εξάλειψη των νεφών, του αδέσποτου ηλιακού φωτός (sunlit), της θάμβωσης (glare)) αυτά πάσχουν από μια σειρά αστοχιών. Μία από τις βασικότερες αδυναμίες των δεδομένων σε σχέση με την αναλυτική τους επάρκεια ως προς το αστικό τοπίο είναι ο «κορεσμός» (saturation) δηλαδή ο τεχνικός περιορισμός της καταγραφής των υψηλών τιμών ακτινοβολίας ( $DN > 63$ ) λόγω περιορισμένου ραδιομετρικού εύρους. Αποτέλεσμα αυτής της τεχνικής αδυναμίας του αισθητήρα είναι η ανεπάρκειά του να περιγράψει με ακρίβεια και λεπτομέρεια την ποικιλομορφία στον αστικό πυρήνα των πόλεων αλλά και η αδυναμία να αναγνωρίσει μικρές οικιστικές μονάδες σε αγροτικές συνήθως περιοχές.

Στα αρνητικά σημεία του DMSP/OLS περιλαμβάνεται η έλλειψη διαβαθμονόμησης των δεδομένων του η οποία καθιστά τις μετρήσεις μεταξύ των λήψεων μη συγκρίσιμες με αποτέλεσμα να μην προκύπτει μια συνεπής και αξιόπιστη χρονοσειρά δεδομένων. Απόρροια του προβλήματος αυτού είναι να απαιτείται επιπλέον επεξεργασία των δεδομένων και η διαβαθμονόμησή τους σε μια κοινή κλίμακα (Elvidge et al., 2009b)

Στην τρέχουσα έρευνα έχει γίνει προσπάθεια να επιλυθεί το πρόβλημα του κορεσμού (βλ. ενότητα 3.1) και να αναδειχθούν οι παραλλαγές του αστικού τοπίου με τον συνδυασμό της μεθόδου VANUI (Zhang et al., 2013) και των δεδομένων SAR, QuickSCAT/Seawinds.

Τέλος, στα δεδομένα DMSP/OLS εντοπίζεται και το φαινόμενο της υπερλάμψης (overglow). Η υπερλάμψη συμβαίνει όταν ο αισθητήρας καταγράφει τιμές όταν δεν υπάρχουν αντίστοιχες πηγές εκπομπής φωτός και εντοπίζεται στα όρια των πραγματικών φωτεινών πηγών (π.χ. στα όρια των πόλεων ή στην θάλασσα πλησίον μιας πόλης).

### 2.1.3 VISIBLE INFRARED IMAGING RADIOMETER (VIIRS) SUITE

Το διάδοχο σύστημα του δορυφόρου DMSP/OLS είναι ο snpp-VIIRS ο οποίος συνδυάζει τα λειτουργικά πλεονεκτήματα των προηγούμενων αστικών και στρατιωτικών ορ-

γάνων. Η National Aeronautics and Space Administration (NASA) ονόμασε τον δορυφόρο που φέρει τον αισθητήρα VIIRS προς τιμήν του Verner E. Suomi, ένα αναγνωρισμένο μετεωρολόγο στο Πανεπιστήμιο του Wisconsin.

Ο snpp-VIIRS αποτελεί μέρος ενός συστήματος δορυφόρων για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος με την ονομασία Joint Polar Satellite System (JPSS). Πρόκειται για ομάδα δορυφόρων νέας γενιάς, πολικής, μη γεωσύγχρονης τροχιάς, και αποτελεί συλλογική προσπάθεια των National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) και NASA (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2010).

Το σύστημα JPSS ξεκίνησε το 2011 ως διάδοχο του συστήματος National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System (NPOESS) αποτελώντας το θεμέλιο του παγκόσμιου συστήματος δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Οι δορυφόροι του περιφέρονται γύρω από την γη από πόλο σε πόλο και διέρχονται από τον ισημερινό 14 φορές την ημέρα την απογευματινή τροχιά παρέχοντας παγκόσμια κάλυψη δύο φορές την ημέρα.

Κύριος στόχος του συστήματος είναι να παρέχει μετεωρολογικά δεδομένα μέσω της μέτρησης ατμοσφαιρικών, ηπειρωτικών και ωκεάνιων συνθηκών όπως δεδομένα για την θερμοκρασία θάλασσας, ατμόσφαιρας και ξηράς, την βλάστηση, τα νέφη, την βροχόπτωση, το χιόνι, τον πάγο, τις πυρκαγιές, τον καπνό στην ατμόσφαιρα, το όζον. Είναι επίσης σε θέση να συμβάλει επικουρικά με την παροχή των δεδομένων αυτών σε υπηρεσίες και προϊόντα που σχετίζονται με την καιρική πρόβλεψη, τα ακραία καιρικά φαινόμενα και τις περιβαλλοντικές καταστροφές.

Το σύστημα JPSS θα παρέχει αδιάλειπτα δεδομένα μέχρι το 2038 και διαθέτει για την αποστολή του τα παρακάτω όργανα:

- Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS)
- Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES)
- Cross-track Infrared Sounder (CrIS)
- Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS)
- Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)

Επιπλέον, διαθέτει μια σειρά δορυφόρων:

- Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP)

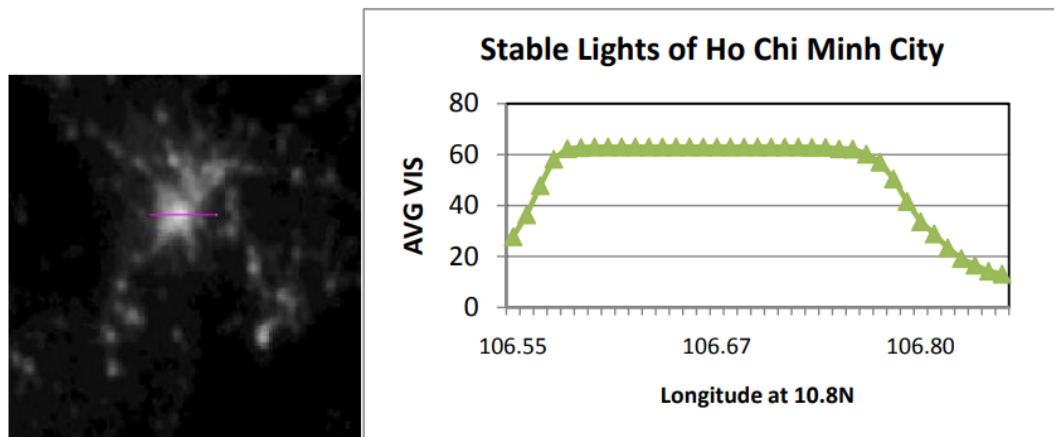
- Joint Polar Satellite System - 1 (JPSS-1/NOAA)
- Joint Polar Satellite System - 2 (JPSS-2)
- Joint Polar Satellite System - 3 (JPSS-3)
- Joint Polar Satellite System - 4 (JPSS-4)
- TSI Calibration Transfer Experiment (TCTE)

Ο αισθητήρας snpp-VIIRS διαθέτει 22 φασματικά κανάλια (bands) (βλ. Πίνακα 1). Ένα από αυτά έχει σχεδιαστεί να καταγράφει το ορατό φάσμα του πλανήτη και της ατμόσφαιρας του με ένα εύρος που καλύπτει την ηλιακή αντανάκλαση, την νυχτερινή σεληνιακή αντανάκλαση και ασθενή εξωτερική αντανάκλαση (Lee et al., 2006). Ο αισθητήρας μπορεί να αναγνωρίσει επίγεια και ατμοσφαιρικά χαρακτηριστικά και φαινόμενα σε συνάρτηση με την σεληνιακή φάση και την αντανάκλαση της σεληνιακής ακτινοβολίας (όπως χιονοκάλυψη, αερομεταφερόμενη σκόνη, καπνό, σύννεφα) αλλά και αυτόφωτες πηγές όπως τα αστικά φώτα, οι φωτιές, οι κεραυνοί και τα πλοία.

Τα σήματα (signals) από τα στάδια καταγραφής (gains) αποθηκεύονται ψηφιακά με εύρος τιμών 14 bit για τα υψηλά (high gain) στάδια και 13 bit για τα μεσαία και χαμηλά στάδια καταγραφής εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο ποιοτικότερα δεδομένα σε σχέση με αυτά του προκατόχου του DMSP/OLS. Λογικά κυκλώματα του αισθητήρα (VIIRS Electronics Module) ανιχνεύουν ανά pixel το βέλτιστο στάδιο καταγραφής ώστε ταυτόχρονα να αποφεύγεται ο κορεσμός (saturation) αλλά και να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Με αυτήν την διαδικασία αφενός παράγονται μη κορεσμένες βαθμονομημένες (calibrated) μετρήσεις για τις φωτεινές λήψεις και αφετέρου μετρήσεις με χαμηλότερη δυναμική κλίμακα με μικρότερο λόγο σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio (SNR)) και ραδιομετρική ακρίβεια στις σκοτεινές σκηνές. Ο κορεσμός (saturation) δημιουργείται λόγω χαμηλής ραδιομετρικής ανάλυσης και περιορισμένου δυναμικού εύρους του αισθητήρα με αποτέλεσμα να προκύπτει αδυναμία καταγραφής των υψηλών τιμών ακτινοβολίας. Αυτό το πρόβλημα, όπως προαναφέρθηκε, εντοπίζεται στον αισθητήρα DMSP/OLS, όπου στον πυρήνα των αστικών κέντρων υπάρχει κορεσμός των τιμών με αποτέλεσμα τιμές ακτινοβολίας  $>63$  να καταγράφονται ως 63 (Ma et al., 2014a) (βλ. παράδειγμα στην Εικόνα 2).

Κανάλι/gain	μήκος κύματος ( $\mu\text{m}$ )	nadir pixel size κατά track $\times$ cross track (km)	Εφαρμογές
M1, dual	0,412	0,742 $\times$ 0,259	Oceancolor, aerosols
M2, dual	0,445	0,742 $\times$ 0,259	Oceancolor, aerosols
M3, dual	0,488	0,742 $\times$ 0,259	Oceancolor, aerosols
M4, dual	0,555	0,742 $\times$ 0,259	Oceancolor, aerosols
I1, single	0,640	0,371 $\times$ 0,387	Imagery, vegetation
M5, dual	0,672	0,742 $\times$ 0,259	Oceancolor, aerosols
M6, single	0,746	0,742 $\times$ 0,776	Atmospheric correction
I2, single	0,865	0,371 $\times$ 0,387	Vegetation
M7, dual	0,865	0,742 $\times$ 0,259	Oceancolor, aerosols
DNB, multiple	0,7	0,742 $\times$ 0,742	Imagery
M8, single	1,24	0,742 $\times$ 0,776	Cloud particle size
M9, single	1,38	0,742 $\times$ 0,776	Cirrus cloud cover
M10, single	1,61	0,742 $\times$ 0,776	Snowfraction
I3, single	1,61	0,371 $\times$ 0,387	Binary snow map
M11, single	2,25	0,742 $\times$ 0,776	Clouds
M12, single	3,70	0,742 $\times$ 0,776	Sea surface temperature
I4, single	3,74	0,371 $\times$ 0,387	Imagery, clouds
M13, dual	4,05	0,742 $\times$ 0,259	SST, fires
M14, single	8,55	0,742 $\times$ 0,776	Cloud-top properties
M15, single	10,76	0,742 $\times$ 0,776	SST
I5, single	11,45	0,371 $\times$ 0,387	Cloud imagery
M16, single	12,01	0,742 $\times$ 0,776	SST

Πίνακας 1: Τα 22 κανάλια του αισθητήρα snpp-VIIRS. (Πηγή: Lee et al., 2006).



Εικόνα 2: Τα φώτα DMSP/OLS για την πόλη Ho Chi Minh. Αριστερά η εικόνα F16/2006 με την τομή ανατολικά-δυτικά. Δεξιά ο μέσος όρος των τιμών DN που αντιστοιχούν στην τομή. (Πηγή: Ziskin et al., 2010).

Τα αδρά δεδομένα (raw data) καταγραφής, σε επόμενα στάδια επεξεργασίας αποδίδουν προϊόντα *“Near Constant Contrast”*, δηλαδή δεδομένα όπου οι μετρήσεις τους είναι σαν να έγιναν υπό ομοιόμορφο φωτισμό.

Ο VIIRS εκτοξεύτηκε στις 28 Οκτωβρίου 2011 (5:48 πμ EDT) επί του δορυφόρου Suomi-npp. Ο snpp-VIIRS είναι ηλιοσύγχρονος δορυφόρος στα  $\sim 824$  km ύψος και διέρχεται από τον ανοδικό σημείο (ascending node) του Ισημερινού περίπου στις 01:30 μ.μ., σε τοπική ώρα (local time), και από το καθοδικό σημείο (descending node) στις 01:30 π.μ.

Το όργανο VIIRS περιλαμβάνει:

- 5 υψηλής ανάλυσης κανάλια (Imagery Channels, I-band))
- 16 μέτριας ανάλυσης (moderate resolution) κανάλια (M-bands)
- 1 κανάλι Day/Night Band (DNB)

Ο αισθητήρας snpp-VIIRS είναι αισθητήρας σάρωσης και καθώς ο δορυφόρος περιφέρεται γύρω από την γη σαρώνει μια λωρίδα σάρωσης (swath) πλάτους 3.040 km (κατά την διεύθυνση cross track). Ένα περιστρεφόμενο κάτοπτρο (mirror) ανακλά την ακτινοβολία σε ένα set από CCD detectors. Μια περιστροφή του κατόπτρου είναι μια σάρωση. Οι μπάντες M και DNB έχουν 16 detectors (16 γραμμές pixel ανά σάρωση). Οι μπάντες I έχουν 32 αισθητήρες με αποτέλεσμα να διαθέτουν και διπλή διακριτική ικανότητα σε σχέση με τις μπάντες DNB και M. Κάθε σάρωση παράγει μια δέσμη/λωρίδα δεδομένων διαστάσεων  $\sim 3.040$  km  $\times$   $\sim 12$  km ενώ 48 σαρώσεις (scans) αποτελούν ένα τμήμα (granule) δεδομένων ( $\sim 85$  seconds δεδομένων,  $\sim 570$  km κατά την διεύθυνση along track). Έτσι κάθε τμήμα καλύπτει μια περιοχή διαστάσεων  $\sim 3.040$  km  $\times$  570 km.

Η διανομή των δεδομένων γίνεται μέσω ανεξάρτητων τμημάτων. Τα ανεπεξέργαστα δεδομένα (raw data records) από τον δορυφόρο μεταβιβάζονται σε επίγειους σταθμούς και κατά κανόνα οι περισσότεροι χρήστες δεν έχουν πρόσβαση σε αυτά. Στην συνέχεια ακολουθεί επεξεργασία των δεδομένων Raw Data Records (RDR) (calibration) και η μετατροπή τους σε αρχεία Sensor Data Records (SDR). Σε αυτό το στάδιο υπολογίζεται η αντίστοιχη πληροφορία γεωαναφοράς (geolocation) και η μετατροπή των raw μετρήσεων σε ακτινοβολία (radiance), αντανάκλαση (reflectance) και θερμοκρασία λαμπρότητας (brightness temperature). Επιπλέον κάποια δεδομένα υπόκεινται περαιτέρω επεξεργασία και προβάλλονται στο προβολικό Ground Track Mercator (GTM) αποφέροντας μια νέα κατηγορία δεδομένων, τα δεδομένα Enviromental Data Records (EDR).

Τα δεδομένα γεωδιόρθωσης (με την σχετική ονοματολογία) για τα επιμέρους κανάλια του snpp-VIIRS είναι (Seaman et al., 2015):

- GDNBO: DNB SDR WGS'84 (γεωδιόρθωση στο ελλειψοειδές, και στο ανάγλυφο μετά τον Μάιο του 2014 κατόπιν απαίτησης των χρηστών)
- GIGTO: I-band EDR Ground - Track Mercator geolocation
- GIMGO: I-band SDR WGS'84 ellipsoid geolocation
- GITCO: I-band SDR terrain corrected geolocaton
- GMGTO: M -band EDR Ground - Track Mercator geolocation
- GMOD0: M-band SDR WGS'84 ellipsoid geolocation
- GMTCO: M-band SDR terrain corrected geolocation
- GNCCO: DNB EDR (Near Constant Contrast, NCC) Ground-Track Mercator geolocation

Οι τιμές της ακτινοβολίας είναι ενσωματωμένες στο κανάλι DNB και δίδονται στην μονάδα  $W\ cm^{-2}\ sr^{-1}$ . Στα μεταδεδομένα η καταγραφή του χρόνου γίνεται είτε σαν character string στο σύστημα Coordinated Universal Time (UTC) είτε σαν 64-bit unsigned integer που είναι ο αριθμός των μικροδευτερολέπτων από τις 00:00:00 UTC στις 1 Ιανουαρίου 1958 (Seaman et al., 2015).



Τα δεδομένα του snpp-VIIRS αποθηκεύονται σε μορφότυπο Hierarchical Data Format (HDF). Το HDF είναι μοντέλο δεδομένων και βιβλιοθήκη που υποστηρίζει την αποθήκευση και διαχείριση σύνθετων, μεγάλων και ετερογενών δεδομένων. Ο μορφότυπος HDF-5 είναι ανοικτού κώδικα, επεκτάσιμος, φορητός με ιεραρχική δομή στην αποθήκευση των δεδομένων και μεταδεδομένων.

Για κάθε τμήμα δεδομένων του snpp-VIIRS δημιουργούνται τα εξής 42 αρχεία εικόνων σε μορφότυπο HDF (μεγέθους ~42 GB)

- 8 αρχεία geolocation (5 SDRs και 3 EDRs)
- 10 I-bands εικόνες (5 SDRs και 5 EDRs)
- 22 M-bands (16 SDRs και 6 EDRs)
- 1 DNB (SDR αρχείο)
- 1 DNB (EDR αρχείο, Near-Constant Contrast).

Κατά κανόνα τα αρχεία snpp-VIIRS ακολουθούν συγκεκριμένη ονοματολογία και αποτελούνται από 8 διακριτά τμήματα.

1. Ο τύπος του αρχείου.
2. το αναγνωριστικό του δορυφόρου (snpp-VIIRS).
3. ημερομηνία λήψης στην μορφή *YYYYMMDD*.
4. ώρα έναρξης UTC του τμήματος δεδομένων στην μορφή *HHMMSS.S*
5. ώρα λήξης UTC του τμήματος δεδομένων στην μορφή *HHMMSS.S*
6. Αριθμός τροχιάς.
7. Ημερομηνία και ώρα δημιουργίας του αρχείου.
8. πηγή του αρχείου των δεδομένων

Τα δεδομένα geolocation του DNB (GDNBO) είναι προβεβλημένα σε *smooth ellipsoid* και περιλαμβάνουν για κάθε pixel:

- Γεωγραφικό μήκος.

- Γεωγραφικό πλάτος.
- Μεσοσταθμικό υψόμετρο εδάφους από την επιφάνεια της θάλασσας.
- Ζενιθιακή γωνία δορυφόρου.
- Αζιμουθιακή γωνία δορυφόρου.
- Ζενιθιακή γωνία ήλιου.
- Αζιμουθιακή γωνία ήλιου.
- Απόσταση από τον δορυφόρο (Satellite Range)
- Ζενιθιακή γωνία σελήνης.
- Αζιμουθιακή γωνία σελήνης.

Ένα από τα μειονεκτήματα των δεδομένων snpp-VIIRS συγκριτικά με τα δεδομένα DMSP/OLS είναι η βραχεία χρονοσειρά (ξεκινά από το 2012).

Τα δεδομένα snpp-VIIRS υπόκεινται σε επιπλέον επεξεργασία και αποδίδουν επιπρόσθετα προϊόντα, χρήσιμα για την έρευνα.

### 2.1.3.1 ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ VIIRS DNB CLOUD-FREE COMPOSITES

Τα δεδομένα snpp-VIIRS παράγονται επιπλέον υπό την μορφή μηνιαίων και ετήσιων σύνθετων (composites) εικόνων νυχτερινής ακτινοβολίας (Version 1 VIIRS Day/Night Band Nighttime Lights) από το Earth Observations Group (EOG) στο NOAA/NCEI.

Έχει προηγηθεί προ-επεξεργασία με εξαίρεση του αδέσποτου φωτός (stray light), των κεραυνών, της σεληνιακή ακτινοβολίας (με εξαίρεση δεδομένων), της νεφοκάλυψης (με την χρήση του προϊόντος VIIRS Cloud Mask) και των δεδομένων στα άκρα της λωρίδας σάρωσης (aggregation zones 29-32).

Η χρονική σύνθεση έχει γίνει σε μηνιαία και ετήσια βάση. Αν και στα ετήσια σύνθετα έχουν αφαιρεθεί τα εφήμερα φώτα (φώτα από το Σέλας, φώτα από πυρκαϊές, φώτα από πλοία) με μια διαδικασία αφαίρεσης ακραίων τιμών (outliers) και το υπόβαθρο (μη φωτεινές πηγές), στις μηνιαίες σύνθετες εικόνες δεν έχουν αφαιρεθεί.

Η γεωγραφική τους κάλυψη είναι από 75°B ως 65°N γεωγραφικό πλάτος, παράγονται ανά 15 δευτέρα μοίρας (arc-seconds) και διατίθενται σε geotiff σε 6 ψηφίδες (tiles) τα

οποία αποκόπτονται στον ισημερινό. Κάθε ψηφίδα περιλαμβάνει την μέση ακτινοβολία της σύνθεσης των επιμέρους εικόνων και το πλήθος των διαθέσιμων παρατηρήσεων.

Στα μηνιαία σύνθετα αρκετές περιοχές του πλανήτη δεν διαθέτουν καλή ποιότητα για ορισμένους μήνες, λόγω νεφοκάλυψης στις τροπικές κυρίως περιοχές και λόγω ηλιακού φωτός σε περιοχές κοντά στους πόλους, κυρίως του θερινούς μήνες.

Τα μηνιαία φώτα (version 1) διατίθενται με δύο διαφορετικές παραμετροποιήσεις. Στην πρώτη περίπτωση (αρχεία με την σήμανση “vcm”), εξαιρούνται όσα δεδομένα επηρεάζονται από το αδέσποτο φως. Στην δεύτερη περίπτωση τα δεδομένα αυτά έχουν υποστεί επεξεργασία αφαίρεσης του αδέσποτου φωτός και περιλαμβάνονται στην διανομή (αρχεία με την σήμανση “vcmsl”). Τα αρχεία αυτά έχουν περισσότερη κάλυψη στους πόλους, αλλά κατώτερης ποιότητας. Τα ετήσια σύνθετα διανέμονται μόνο με την πρώτη παραμετροποίηση, δηλαδή με εξαίρεση των δεδομένων που επηρεάζονται από το αδέσποτο φως.

Τα ονόματα των αρχείων των δεδομένων περιλαμβάνουν 7 πεδία τα οποία διαχωρίζονται με “\_”, σε κάθε πεδίο μπορεί να υπάρχει επιπλέον διαχωριστικό με “-” και τέλος το όνομα ακολουθείται από μια επέκταση (extension). Ένα αρχείο σύνθετων νυχτερινών δεδομένων είναι π.χ.

*SVDNB\_npp\_20140501-20140531\_global\_vcmcfg\_v10\_c201502061154.avg\_rade9*,  
όπου: Πεδίο 1: VIIRS SDR ή το προϊόν από το οποίο δημιουργήθηκε το composite  
”SVDNB”

Πεδίο 2: όνομα δορυφόρου, “npp”

Πεδίο 3: χρονικό εύρος, “20140501-20140531”

Πεδίο 4: περιοχή ενδιαφέροντος, “global”

Πεδίο 5: συντομογραφία παραμετροποίησης, “vcmcfg”

Πεδίο 6: έκδοση “v10” είναι η έκδοση 1.0

Πεδίο 7: ημερομηνία/ώρα δημιουργίας

Extension: avg\_rade9

Το Πεδίο 5 μπορεί να λαμβάνει διάφορες τιμές για την συντομογραφία παραμετροποίησης:

- “vcm-orm” (VIIRS Cloud Mask - Outlier Removed), τα δεδομένα έχουν υποστεί αφαίρεση ακραίων τιμών (outliers) για την εξαίρεση των πυρκαγιών και άλλων εφήμερων φώτων.

- “vcm-orm-ntl” (VIIRS Cloud Mask - Outlier Removed - Nighttime Lights) είναι η παραμετροποίηση “vcm-orm” όπου το υπόβαθρο (non-lights) έχει οριστεί σε μηδέν.
- “vcm-ntl” (VIIRS Cloud Mask - Nighttime Lights), περιλαμβάνει την παραμετροποίηση “vcm”, όπου το υπόβαθρο (non-lights) έχει οριστεί σε μηδέν.

Τα δεδομένα διανέμονται υπό την μορφή συμπιεσμένων αρχείων (tarballs), όπου το καθένα περιλαμβάνει δύο geotiff.

Τα αρχεία με extensions “avg\_rade9” περιέχει τιμές ακτινοβολίας κινητής υποδιαστολής (floating point) σε  $\text{nW cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$  (πολλαπλασιαζόμενες με  $1 \times 10^9$  για λόγους αναγνωσιμότητας από ορισμένα λογισμικά).

Τα αρχεία με το extension “cf\_cvg” είναι σε ακέραιες τιμές και περιλαμβάνει το πλήθος των ακάλυπτων από νέφη παρατηρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των σύνθετων αρχείων.

Ενώ τα αρχεία με extension “cvg” δίνουν σε ακέραιες τιμές το πλήθος των συνολικών παρατηρήσεων που είναι διαθέσιμες για τα δεδομένα.

Οι βασικότερες αβεβαιότητες των δεδομένων snpp-VIIRS DNB Cloud-Free Composites εντοπίζονται σε διακυμάνσεις που εξαρτώνται από εποχικές επιδράσεις της βλάστησης και της χιονοκάλυψης (Levin, 2017) αλλά και από ασυνήθιστα φώτα από πυρκαϊές, ηφαίστεια, υποκείμενο θόρυβο και την λάμψη από την καύση αερίων (gas flares) (Shi et al., 2014). Για τον μετριασμό των αδυναμιών αυτών έχουν προταθεί αντίστοιχες μεθοδολογίες διόρθωσης (Tu et al., 2020).

### 2.1.3.2 ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ BLACK MARBLE

Η σουίτα δεδομένων “Black Marble” (VNP46A1/A2) είναι μια νέα κατηγορία δεδομένων νυχτερινών φώτων της NASA (Román et al., 2018). Η χρονοσειρά τους είναι διαθέσιμη από τον Ιανουάριο του 2012 και δημοσιεύθηκε πρόσφατα (το 2020). Έχει διακριτική ικανότητα τα 500 m, παράγονται καθημερινά σε διάστημα 3-5 ωρών, χαρακτηριστικό που τα καθιστά χρηστικά τόσο για εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο (near-real time) όσο και για εφαρμογές μακροχρόνιας παρακολούθησης. Η σουίτα VNP46 περιλαμβάνει την καθημερινή στον αισθητήρα (at-sensor), στο ανώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας (top of atmosphere, TOA) νυχτερινή ακτινοβολία (προϊόν VNP46A1) και την διορθωμένη από την σεληνιακή επίδραση ακτινοβολία νυχτερινού φωτός (προϊόν VNP46A2). Η χρονο-

σειρά του προϊόντος VNP46A1 είναι πλήρως διαθέσιμη για όλον τον πλανήτη σε αντίθεση με την χρονοσειρά του προϊόντος VNP46A2 η οποία είναι υπό επεξεργασία και αναρτάται σταδιακά στο σχετικό σημείο διανομής (Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center, NASA).

Ο αλγόριθμος ανάκτησης και επεξεργασίας, αναπτύχθηκε και εφαρμόζεται περιοδικά με παγκόσμια κάλυψη από το NASA Land Science Investigator-led Processing System (SIPS). Αποδίδει υψηλής ποιότητας δεδομένα, χωρίς νεφοκάλυψη, διορθωμένης ακτινοβολίας από ατμοσφαιρικές επιδράσεις, την γεωμετρία του εδάφους, την βλάστηση, το χιόνι, την σεληνιακή επίδραση και την επίδραση από το αδέσποτο στον αισθητήρα φως (stray light). Στα βασικά χαρακτηριστικά του αλγόριθμου περιλαμβάνονται:

- μοντέλο έντασης σεληνιακής ακτινοβολίας για τον υπολογισμό μη γραμμικών μεταβολών της φάσης και των λικνίσεων (libration) της σελήνης.
- διόρθωση Bidirectional reflectance distribution function (BRDF) και ατμοσφαιρικών επιδράσεων
- μοντέλο κομοστέγης (canopy) και γεωμετρικής οπτικής της διάδοσης της ακτινοβολίας για τον υπολογισμό των εποχικών μεταβολών των νυχτερινών φώτων.
- χρονικό πλήρωσης κενών για την μείωση των μόνιμων μη διαθέσιμων δεδομένων.

Πιο συγκεκριμένα τα δεδομένα του προϊόντος VNP46A1 περιλαμβάνουν 26 SDS θεματικά επίπεδα (layers) μεταξύ των οποίων περιλαμβάνεται η ακτινοβολία αισθητήρα, ηλιακή (και σεληνιακή) αζιμουθιακή και ζενιθιακή γωνία στον αισθητήρα, φίλτρο νεφών (cloud mask), χρόνο σάρωσης, κανάλι υπέρυθρης ακτινοβολίας (IR shortwave radiance), θερμοκρασίες λαμπρότητας (brightness temperatures), ποιοτικές επισημάνσεις (quality flags) καθώς και σεληνιακές πληροφορίες κατά τον χρόνο σάρωσης των δεδομένων (γωνία φάσης και ποσοστό φωτισμού της σελήνης).

Τα δεδομένα της σουίτας “Black Marble” έχουν ενδοαστικές εφαρμογές, έχουν χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό αγροτικών και άτυπων οικισμών, τον ηλεκτροφωτισμό ή ηλεκτροδότηση μιας περιοχής, την αποτίμηση των φυσικών καταστροφών και την ανάκτηση από αυτές (Stokes et al., 2019), την κατανόηση των εποχιακών ή ημερήσιων μετακινήσεων του πληθυσμού (Román και Stokes, 2015)

Τα πιο δυνατά σημεία των δεδομένων snpp-VIIRS έναντι των δεδομένων DMSP/OLS (βλ. Πίνακα 2) είναι το μεγαλύτερο ραδιομετρικό εύρος, η αυξημένη χωρική ανάλυση και

η διαβαθμονόμησή τους, γεγονός που τα καθιστά χρήσιμα δεδομένα για έρευνα στον τομέα των οικονομικών επιστημών, την επιδημιολογία, την οικολογία, τις φυσικές επιστήμες και την μετεωρολογία (Elvidge et al., 2013). Τα δεδομένα snpp-VIIRS διατίθενται σε ποικίλα χρονικά βήματα (ημερήσια, μηνιαία, ετήσια) σε σχέση με αυτά του DMSP/OLS που διατίθενται μόνο σε ετήσια βάση. Ωστόσο από όλες τις κατηγορίες δεδομένων αυτή του DMSP/OLS διαθέτει την παλαιότερη και πιο μακροχρόνια χρονοσειρά.

Χαρακτηριστικό	DMSP	VIIRS
Διαθεσιμότητα	1992–2013	2012–παρόν αδιόρθωτα 2014–παρόν διορθωμένα από αδέσποτο φως
Χωρική ανάλυση	30 arc seconds (~1 km)	Δεδομένα SDR: ~0,75 km Black Marble: ~0,50 km
Χρονική ανάλυση	έτος	έτος, μήνας, ημέρα
Καταλληλότητα για ανάλυση χρονοσειράς	Κατόπιν διαβαθμονόμησης	Ναι (υπάρχουν περιορισμοί, βλ ενότητα 2.1.7)
Ραδιομετρική ανάλυση	6-bit	12 ή 14-bit
Φασματικό εύρος	0,4-1,1 $\mu\text{m}$	0,5-0,89 $\mu\text{m}$
Μονάδα μέτρησης	Σχετικές τιμές (0–63)	Ακτινοβολία ( $\text{nW cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ )
Χρόνος διέλευσης	~19:30	~01:30
Διαβαθμονόμηση στο σκάφος	Όχι	Ναί
Κορεσμός	Ναί	Όχι

Πίνακας 2: Σύγκριση των χαρακτηριστικών των δεδομένων DMSP/OLS και snpp-VIIRS. (Πηγή: Stathakis και Baltas, 2018· Tu et al., 2020).

#### 2.1.4 LUOJIA1-01

Ο δορυφόρος LuoJia 1-01 (LJ1-01) είναι ο πρώτος κινεζικός δορυφόρος από το πανεπιστήμιο της Wuhan ο οποίος εκτοξεύτηκε στις 2 Ιουνίου 2018 για την παρακολούθηση των νυχτερινών φώτων. Ο δορυφόρος είναι κατασκευής του Chang Guang Satellite Technology Co και είναι εξοπλισμένος με τον αισθητήρα 4-megapixel scientific CMOS Image Sensor. Πρόκειται για έναν μικροδορυφόρο (βάρους 20 kg), χαμηλής τροχιάς, με κάμερα υψηλής ευαισθησίας λήψης νυχτερινών φώτων, ραδιομετρική ανάλυση 14 bit, χω-

ρική διακριτική ικανότητα 130 m και λωρίδα σάρωσης 250 km. Έχει περίοδο επανάληψης (revisit period) και παγκόσμια κάλυψη ανά 15 ημέρες. Τα δεδομένα του παρέχονται δωρεάν από το High-Resolution Earth Observation System του Hubei Data and Application Center.

Λόγω της υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας ο LJ1-01 παρέχει πιο ακριβή πληροφορία για την ποικιλομορφία του αστικού τοπίου και την απόδοση του αστικού αποτυπώματος (βλ. Εικόνα 3). Όσον αφορά την εξαγωγή της αστικής έκτασης (urban extent extraction) η χρήση του ενδέχεται ως ένα βαθμό να καλύψει τα κενά στο πεδίο των νυχτερινών φώτων στην έρευνα τοπικής κλίμακας (Li et al., 2018).

Συγκριτικά με τα δεδομένα snpp-VIIRS, ο LJ1-01 έχει αυξημένες δυνατότητες για την μοντελοποίηση κοινωνικο-οικονομικών στατιστικών δεδομένων λόγω της υψηλής διακριτικής του ικανότητας και την καλύτερη απόδοση των νυχτερινών δραστηριοτήτων (Sun et al., 2020· Zhang et al., 2019).

Ωστόσο, ο LJ1-01 έχει βραχεία χρονοσειρά ακόμα, με περιορισμένη προς το παρόν χρησιμότητα και εφαρμογές για διαχρονική μελέτη των αστικών φαινομένων και της δυναμικής τους.

### 2.1.5 ΔΙΕΘΝΗΣ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ

Μια εναλλακτική πηγή δεδομένων νυχτερινών φώτων, διαφορετική ως προς τα καθιερωμένα πρότυπα, είναι οι φωτογραφίες που λαμβάνονται από τους αστροναύτες στον ISS (Διεθνής Διαστημικός Σταθμός).

Αν και οι λήψεις αυτές γίνονται επί χρόνια, η ποιότητά τους πρόσφατα (το 2012) αναβαθμίστηκε με την εγκατάσταση του οργάνου European Space Agency NightPod. Το συγκεκριμένο όργανο λαμβάνει εικόνες υψηλής ανάλυσης (10 m) σε τρία φασματικά κανάλια (RGB) και μεταβλητή ώρα λήψης.

Οι εικόνες από τον ISS είναι ένα είδος πολυφασματικών εικόνων για τις οποίες διατίθεται τόσο νυχτερινό όσο και ημερήσιο αρχείο. Το αρχείο των φωτογραφιών είναι διαθέσιμο στην σχετική διαδικτυακή πύλη της NASA “The Gateway to Astronaut Photography of Earth” (Earth Science and Remote Sensing Unit, 2000)

Δεδομένου ότι αυτές οι εικόνες λαμβάνονται με έναν τυπικό φακό δεν διαθέτουν την κατάλληλη γεωγραφική πληροφορία (γεωαναφορά) ώστε να είναι εύκολος ο γεωγραφικός εντοπισμός συγκεκριμένων πόλεων. Η πλατφόρμα “Atlas of astronaut photos of Earth at

night” (de Miguel et al., 2014) δημιουργήθηκε για να δώσει λύση σε αυτό το πρόβλημα. Ο άτλαντας περιλαμβάνει καταλογοποιημένες εικόνες με αντίστοιχες επισημάνσεις (tags) κατόπιν αναγνώρισης τους από ένα δίκτυο επιστημόνων και πολιτών.

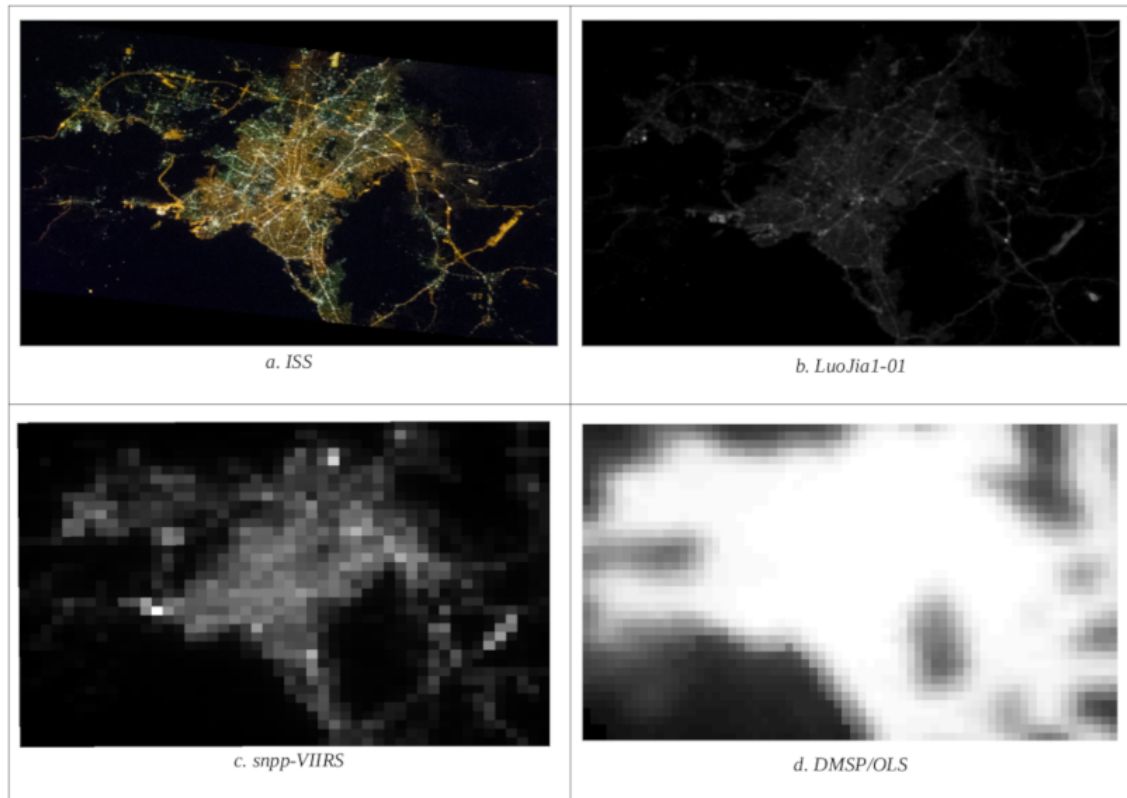
Περιορισμοί υπεισέρχονται από την τροχιά του ISS δεδομένου ότι αυτή προσεγγίζει γεωγραφικά πλάτη μέχρι  $51,6^\circ$  από τον ισημερινό, αποκλείοντας με αυτόν τον τρόπο την ορατότητα αρκετών πόλεων. Επιπλέον, το χαμηλό ύψος τροχιάς και η αναγκαιότητα να περιοριστούν οι ατμοσφαιρικές επιδράσεις μέσω της λήψης φωτογραφιών σε ζώνες κοντά στο ναδίρ, μειώνουν τις επιλογές και την συχνότητα λήψης φωτογραφιών για τις πόλεις. Ακόμα, η ποιότητα των εικόνων επηρεάζεται από το παράθυρο του ISS το οποίο παρεμβάλλεται κατά την λήψη ενώ μπορεί να αποκλείσει τελείως την λήψη όταν αυτό φωτίζεται από τον ήλιο.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των εικόνων ISS είναι η ακανόνιστη συχνότητα και ώρα λήψης τους. Ενώ ο snpp-VIIRS έχει συγκεκριμένο χρόνο λήψης εικόνων κατά τις 01:30 πμ τοπική ώρα, ο ISS προσφέρει, μέσω του πληρώματός του (Crew Earth Observations-CEO), την δυνατότητα λήψης σε ποικίλες χρονικές στιγμές κατά την διάρκεια της νύχτας λαμβάνοντας έτσι διαφορετικά στιγμιότυπα των αστικών λειτουργιών (με δεδομένους τους περιορισμούς όπως νεφοκάλυψη, βέλτιστη λήψη εικόνων στο ναδίρ, περιορισμός λήψεων μέχρι συγκεκριμένο γεωγραφικό πλάτος λόγω της τροχιάς του κτλ). Η ασυνεπής διέλευση της τροχιάς του ISS (ηλιο-ασύγχρονη) μπορεί να αποτελέσει μειονέκτημα ή και πλεονέκτημα ανάλογα την περίπτωση.

Η τροχιά του ISS καλύπτει περίπου το 90 % των κατοικημένων περιοχών της γης και επιτρέπει την διέλευση από το ίδιο σημείο σε διαφορετικές ώρες της νύχτας αλλά και μέρας. Αυτό επιτρέπει στον ISS να καταγράφει επαρκώς βραχυχρόνια συμβάντα, όπως φυσικές καταστροφές, ιδιότητα που δεν απαντάται στους δορυφόρους πολιτικής τροχιάς.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα, όπως προαναφέρθηκε, των δορυφορικών εικόνων από τον LJ1-01 και των φωτογραφιών από τον ISS είναι η υψηλή χωρική ανάλυσή τους. Η διαφορά τους αποτυπώνεται εμφανώς στην Εικόνα 3 από την οποία προκύπτει ότι οι εικόνες από τον DMSP/OLS επαρκούν για ανάλυση επιπέδου πόλης, αυτές του snpp-VIIRS και του LJ1-01 για ανάλυση επιπέδου γειτονιάς και του ISS για ακόμα πιο μεγάλη κλίμακα, μέχρι οδικού δικτύου και οικοδομικού τετραγώνου.





Εικόνα 3: Αθήνα, εικόνες από ISS, LJ1-01, snpp-VIIRS, DMSP/OLS. (Πηγή: ISS, LJ1-01, snpp-VIIRS, DMSP/OLS, ίδια επεξεργασία).

Η παρακάτω εικόνα ISS αποτυπώνει την Αθήνα όπου αποδίδεται με χαρακτηριστική ακρίβεια το οδικό δίκτυο, τα όρια ανάμεσα σε αστικό και μη αστικό τοπίο, η αστική ποικιλομορφία μέσω χαρακτηριστικών πυρήνων και χρωματικής απόχρωσης. Τα στοιχεία αυτά αποδίδονται σε μικρότερο βαθμό στις εικόνες LJ1-01 και snpp-VIIRS και σχεδόν καθόλου σε αυτές του DMSP/OLS.



Εικόνα 4: Αθήνα, χαρακτηριστική δορυφορική εικόνα ISS (ISS030-E-208788). (Πηγή: Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center).

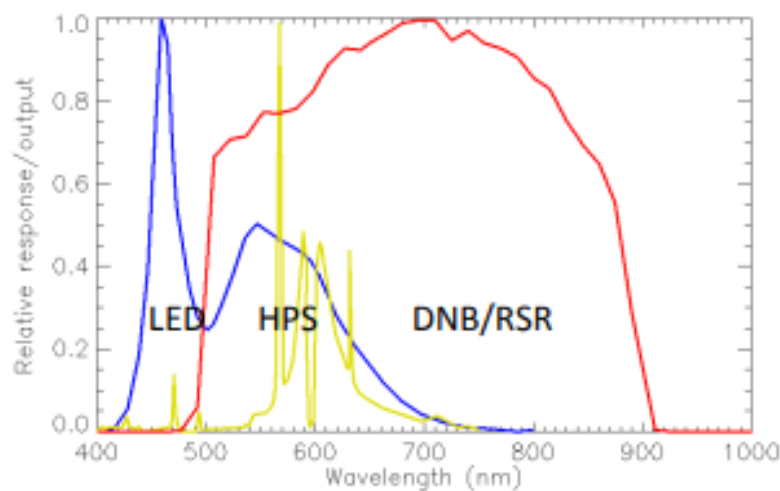
Χαρακτηριστικό	Παράμετρος
NASA Photo ID	ISS030-E-208788
Focal Length	400mm
Date taken	2012.04.05
Time taken	20:40:20 GMT
Camera	Nikon D3S Electronic Still Camera
Focal Length	400mm
Camera Tilt	40 degrees
Format	Nikon FX: 4256x2832 pixel CMOS sensor

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά της κάμερας λήψης και εικόνας ISS (ISS030-E-208788). (Πηγή: Earth Science and Remote Sensing Unit, NASA Johnson Space Center).

Πρόσφατες έρευνες, προσπαθούν να διερευνήσουν τις συνέπειες της ακτινοβολίας LED (Δίοδου Εκπομπής Φωτός, Light Emitting Diode) και γενικότερα της φωτορύπανσης, στην υγεία των ανθρώπων (Garcia-Saenz et al., 2018· Grubisic et al., 2019), στα φυσικά οικοσυστήματα και την βιοποικιλότητα (Pawson και Bader, 2014). Από την άποψη αυτή τόσο οι εικόνες snpp-VIIRS και LJ1-01 όσο και οι εικόνες ISS (με το πλεονέκτημα της καταγραφής της φωτεινότητας των λαμπτήρων LED) αποτελούν σημαντική πηγή δε-

δομένων για έρευνες επιδημιολογικής και οικολογικής γενικότερα φύσεως.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των εικόνων ISS είναι το γεγονός ότι αποδίδει με χρωματική διαβάθμιση (RGB) όλα τα νυχτερινά φώτα ακόμα και από τους λαμπτήρες LED. Να σημειωθεί ότι ένα διόλου ασήμαντο ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τους λαμπτήρες LED δεν καταμετράται από τον αισθητήρα snrrp-VIIRS (Cao και Bai, 2014· Kyba et al., 2017b) γιατί η αυξημένη εκπομπή της μπλε ακτινοβολίας (κοντά στα 450 nm) είναι εκτός της φασματικής απόκρισης (spectral response) του αισθητήρα snrrp-VIIRS (βλ. Διάγραμμα 1).



Διάγραμμα 1: VIIRS DNB relative spectral response (RSR) function, LED and High Pressure Sodium (HPS) Lamp Spectrum (Πήγη: Cao και Bai, 2014)

Αποτέλεσμα αυτή της υπεροχής των εικόνων ISS είναι ότι μπορεί να αποδώσει πληροφορίες για την αστική λειτουργία που δεν είναι ορατές στους άλλους αισθητήρες. Ειδικά τα τελευταία χρόνια, η μετάβαση του φωτισμού του αστικού περιβάλλοντος από λαμπτήρες HPS (High Pressure Sodium, λαμπτήρες νατρίου υψηλής πίεσης) σε λαμπτήρες LED, έχει οδηγήσει σε αρκετές περιπτώσεις σε εσφαλμένα συμπεράσματα για μείωση της συνολικής νυχτερινής ακτινοβολίας (Kyba et al., 2017b). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Μιλάνο, όπου στο κέντρο της πόλης οι λαμπτήρες HPS αντικαταστάθηκαν από λαμπτήρες LED και στα περίχωρα διατηρήθηκαν οι λαμπτήρες HPS με συνέπεια στις εικόνες VIIRS να καταγράφεται μια διαχρονική μείωση της νυχτερινής ακτινοβολίας. Και αυτό διότι όπως αναφέρθηκε ο αισθητήρας VIIRS δεν είναι επαρκής στην καταγραφή του πλήρους φάσματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από τους λαμπτήρες LED, στην ζώνη 400 με 500 nm. Ωστόσο εικόνες της πόλης από τον ISS για το 2012 και 2015 αποκάλυψαν

ότι δεν πρόκειται για μείωση της ακτινοβολίας αλλά για μετάβαση στις νέες τεχνολογίες φωτισμού. Η σταδιακή λοιπόν μετάβαση σε λαμπτήρες φωτισμού LED ενέχει τον κίνδυνο να καταγραφεί από τους αισθητήρες snpp-VIIRS και LJ1-01 σαν μείωση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Η παραπάνω διατύπωση αναδεικνύει προβληματικές τις έρευνες που στηρίζονται σε χρονοσειρές και προβαίνουν σε συγκριτική θεώρηση επιμέρους αστικών περιοχών ανά την υφήλιο. Απαιτείται κατά συνέπεια μια συνθετική προσέγγιση με δεδομένα που να περιλαμβάνουν και εικόνες ISS όπου αποδίδεται ικανοποιητικά η μετάβαση στις τεχνολογίες LED.

### 2.1.6 ΑΛΛΕΣ ΠΗΓΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

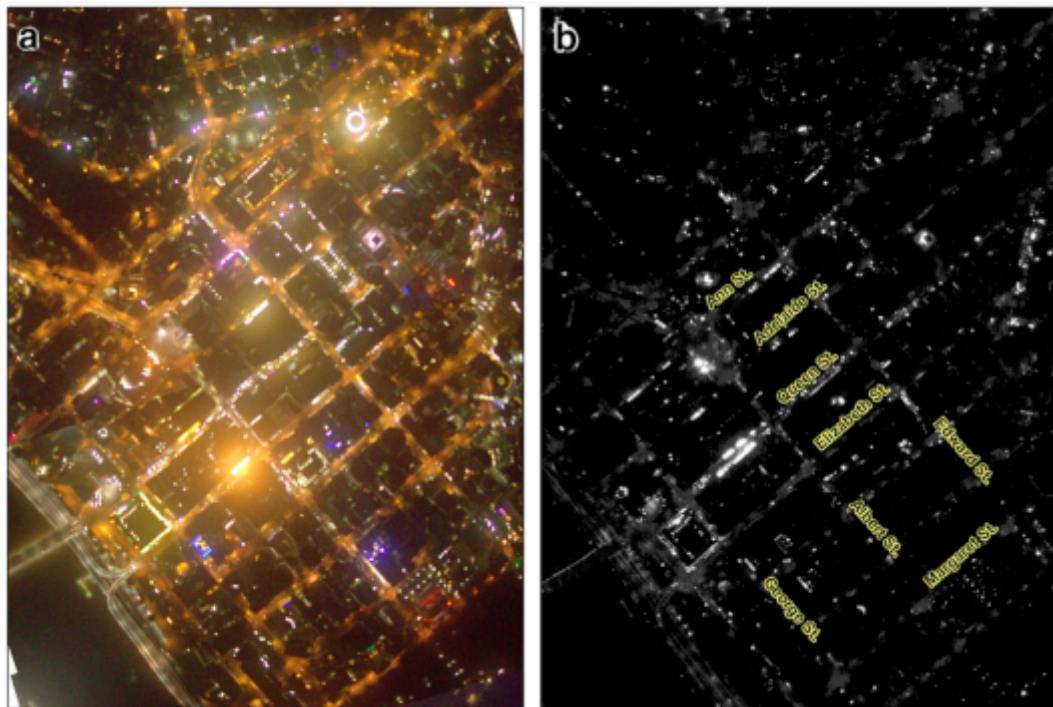
Εκτός από τις παραπάνω πηγές δεδομένων, που είναι και οι πιο δεδομένες για έρευνα αστικής φύσεως υπάρχουν ή πρόκειται να διατεθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα και άλλα προϊόντα νυχτερινών φώτων, λιγότερο γνωστά.

Τα δεδομένα EROS-B υψηλής διακριτικής ικανότητας, με τον αισθητήρα PIC-2/TDI, διαθέσιμα από τα μέσα του 2013, είναι Ισραηλινής προέλευσης και διατίθενται εμπορικά από τον πάροχο ImageSat. Έχουν ραδιομετρική ανάλυση 16 bits, λωρίδα σάρωση 8,3 km και χωρική διακριτική ικανότητα 0,7 m στο φασματικό μήκος κύματος 0,5  $\mu\text{m}$ –0,9  $\mu\text{m}$  (Zhao et al., 2019).

Οι τιμές της λαμβανόμενης φωτεινότητας δεν δίνονται σε φυσικές μονάδες μέτρησης αλλά σε ψηφιακούς αριθμούς (DN). Ένα μειονέκτημα είναι ότι δεν παρέχονται μέθοδοι και πληροφορίες από τον πάροχο για την μετατροπή αυτών των δεδομένων από ψηφιακούς αριθμούς σε τιμές ακτινοβολίας ούτε τα ελάχιστα όρια αναγνώρισης (detection threshold) ακτινοβολίας του αισθητήρα (Katz και Levin, 2016). Τα δεδομένα EROS-B είναι μια σημαντική εναλλακτική στις εικόνες που λαμβάνονται από τον ISS δεδομένου ότι αυτά λαμβάνονται με συστηματικό τρόπο όσον αφορά τον χώρο και τον χρόνο λήψης (Levin et al., 2014).

Τα δεδομένα παρέχονται χωρίς διορθώσεις από την σεληνιακή ακτινοβολία, έναν σημαντικό παράγοντα επίδρασης στις τιμές μέτρησης της παρατηρούμενης φωτεινότητας. Χαρακτηριστικά παραδείγματα με την χρήση δεδομένων EROS-B αποτελούν η έρευνα των Katz και Levin (2016) για την φωτορύπανση στην Ιερουσαλήμ. Στην έρευνα αυτή έγινε σύγκριση μετρήσεων από επίγεια όργανα Sky Quality Meter (SQM) και δεδομένα EROS-B για εκτιμηθεί τόσο το μέγεθος της φωτορύπανσης όσο και η αντιστοιχία μεταξύ

των μετρήσεων των δυο επιμέρους τρόπων μέτρησης. Σύμφωνα με το αποτέλεσμα, οι μετρήσεις φωτορύπανσης από το όργανο SQM διαφέρουν ανάλογα με την διεύθυνση λήψης αναδεικνύοντας έτσι την τρισδιάστατη φύση του προβλήματος και την αναγκαιότητα να ληφθεί αυτή η παράμετρος υπόψιν όταν χρησιμοποιούνται δεδομένα νυχτερινών φώτων για την ανάλυση του φαινομένου. Ανάλογη είναι και η έρευνα των Levin et al. (2014) για την εκτίμηση της φωτορύπανσης στο Brisbane της Αυστραλίας συγκριτικά με την κάλυψη και την χρήση γης. Οι αστικές χρήσεις γης μπορούν να εξηγήσουν τα χωρικά πρότυπα των νυχτερινών φώτων με τους οδικούς άξονες και τις χρήσεις εμπορίου και υπηρεσιών να είναι από τις πιο φωτεινές χρήσεις γης.



Εικόνα 5: Η πόλη του Brisbane στην Αυστραλία όπως φαίνεται από αεροφωτογραφίες ανάλυσης 30m (αριστερά) και από εικόνα EROS-B (δεξιά). (Πηγή Levin et al., 2014).

Άλλη μια πηγή νυχτερινών δεδομένων, επί του δορυφόρου Unicorn-2A, εμπορικής διάθεσης, αναμένεται να είναι διαθέσιμη τον Ιούνιο του 2021 (Alba Orbital 2019). Η Alba Orbital σε συνεργασία με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ΕΟΔ) ανέπτυξε τον μικρο-δορυφόρο τεχνολογίας 3p PocketQube platform με την ονομασία Unicorn-2 με την χρήση του οποίου επιτυγχάνεται χαμηλότερο κόστος για το hardware και την εκτόξευση. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές θα διανέμει πανχρωματικά δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης (24m), ραδιομετρικής ανάλυσης 10 bits, ευαισθησία λήψης 600 mV/Lux-sec και συχνότητα επανάληψης 28 ημερών. Αρχικά τα δεδομένα θα παρέχονται σαν παγκόσμια μηνιαία σύνθετα. Θα ακολουθήσουν και άλλες αποστολές με καλύτερα τεχνικά χα-

ρακτηριστικά όσο αφορά την λήψη και διαβίβαση δεδομένων νυχτερινών φώτων.

Τα δεδομένα νυχτερινών φώτων που παρέχει ο δορυφόρος Jilin1-03B (JL1-3B) είναι επίσης άλλη μια εμπορική πηγή δεδομένων υψηλής ευκρίνειας. Ο δορυφόρος εκτοξεύτηκε στις 9 Ιανουαρίου 2017 από την κινεζική εταιρία δορυφόρων Chang-guang Satellite Technology Co., Ltd. και η εμπορική διάθεση ξεκίνησε από την 1 Απριλίου 2017. Πρόκειται για ηλιοσύγχρονο δορυφόρο με ύψος τροχιάς τα 535 km. Ο αισθητήρας του έχει κατώτατο όριο διακριτικής ικανότητας ακτινοβολίας τα  $7 \times 10^{-7} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  και ενσωματώνει τα τεχνικά πλεονεκτήματα διαστημικής και αεροπορίας αφού έχει χωρική διακριτική ικανότητα 0,92 m, χρόνο λήψης στις 10:30 μμ στον ισημερινό (τοπική ώρα), μέση συχνότητα επανάληψης 3 ημέρες, πολυφασματικά και πανχρωματικά κανάλια ραδιομετρικής ανάλυσης 8 bit και ραδιομετρική διαβαθμονόμηση επί του σκάφους (Apollo Mapping, 2019· Zheng et al., 2018). Τέλος, ο δορυφόρος νέας γενιάς JL1-07/08, επίσης υψηλής ραδιομετρικής ευκρίνειας, εκτοξεύτηκε το 2018. Έχει αντίστοιχα χαρακτηριστικά με τον δορυφόρο Jilin1-03B και βελτιωμένα παγχρωματικά και πολυφασματικά κανάλια.

Στο Πίνακα 4 παρουσιάζονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά των δεδομένων νυχτερινών φώτων.

Δορυφόρος/ Αισθητήρας	Τύπος Δεδομένων	Διαθεσιμότητα	Διαθέσιμη Περίοδος	Χωρική Ανάλυση	Φασματικά Κανάλια	Ραδιομετρική Ανάλυση
DMSP/OLS	Χρονοσειρά	Δωρεάν	1992-2013 Ετήσιο	30 arc-second	Πανχρωματικά 400-1100 nm	6bit
	Διαβαθμονομημένο Προϊόν	Δωρεάν: <a href="https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html">https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html</a>	1996, 1999, 2000, 2003, 2004, 2006, 2010, 2011	30 arc-second	Πανχρωματικά 400-1100 nm	6bit
	Ημερήσιο και Μηνιαίο προϊόν	Όχι ελεύθερο	Κατόπιν παραγγελίας	30 arc-second	Πανχρωματικά 400-1100 nm	6bit
	Μηνιαία Σύνθετα	Δωρεάν: <a href="https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html">https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html</a>	04/2014-Παρόν	15 arc-second	Πανχρωματικά 505-890 nm	14bit
snpp-VIIRS	Ετήσια Σύνθετα	Δωρεάν: <a href="https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html">https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.html</a>	2012-2020	15 arc-second	Πανχρωματικά 505-890 nm	14bit
	Προϊόν Black Marble (VNP46A1/A2)	Δωρεάν: <a href="https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/">https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/</a>	19/01/2012-Παρόν, Ημερήσια	500m	Πανχρωματικά 505-890 nm	14bit
	Black Marble υψηλής ευκρίνειας	Υπο δοκιμές	Μη διαθέσιμα	<30m	Πανχρωματικά 505-890 nm	14bit
ISS	Εικόνες λήψεις Από τον ISS	Δωρεάν: <a href="http://eol.jsc.nasa.gov">http://eol.jsc.nasa.gov</a> <a href="http://www.citiesatnight.org">http://www.citiesatnight.org</a>	2003-Παρόν Ακανόνιστες λήψεις	5-200m	RGB	8-14bit
EROS-B	Υψηλής ανάλυσης	Εμπορική διάθεση	Μέσα του 2013	0,7m	Πανχρωματικά	16bit

Πίνακας 4(συνέχεια στην επόμενη σελίδα)

συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα

Δορυφόρος/ Αισθητήρας	Τύπος Δεδομένων	Διαθεσιμότητα	Διαθέσιμη Περίοδος	Χωρική Ανάλυση	Φασματικά Κανάλια	Ραδιομετρική Ανάλυση
JL1-3B	Πολυφασματικές	Εμπορική διάθεση	Εκτόξευση το 2017	0,92m	430-512nm 489-585nm 580-720nm	8bit
JL1-07/08	Πανχρωματικές/ Αναβαθμισμένες Πολυφασματικές	Εμπορική διάθεση	Εκτόξευση το 2018	0,92m	Πανχρωματικές/ Πολυφασματικές	-
LJ1-01	Υψηλής ανάλυσης	Δωρεάν: <a href="http://eol.jsc.nasa.gov">http://eol.jsc.nasa.gov</a> <a href="http://www.citiesatnight.org">http://www.citiesatnight.org</a>	Εκτόξευση το 2018	130m	Πανχρωματικά 480-800nm	14bit
Unicorn-2/ PocketQube	Υψηλής ανάλυσης	Εμπορική διάθεση: <a href="http://www.albaorbital.com/">http://www.albaorbital.com/</a>	Αναμένεται: 06/2021	24m	RGB	10bit

Πίνακας 4: Τα βασικά χαρακτηριστικά των κυριότερων πηγών δεδομένων νυχτερινών φώτων. (Πηγή: Zhao et al. 2019, ιδία επεξεργασία).



### 2.1.7 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΧΡΗΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΝΥΧΤΕΡΙΝΩΝ ΦΩΤΩΝ

Τα δεδομένα snpp-VIIRS υπερτερούν σε σχέση με τα δεδομένα DMSP/OLS σε πολλά σημεία. Ωστόσο η εφαρμογή τους στην έρευνα του αστικού χώρου δεν παύει να δυσχεραίνεται από μια σωρεία τεχνικών, γεωφυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Η νυχτερινή εκπεμπόμενη ακτινοβολία μιας συγκεκριμένης περιοχής μπορεί ανά επαναλαμβανόμενες μετρήσεις να είναι μεταβαλλόμενη λόγω μιας σειράς συνθηκών και παραγόντων (Coesfeld et al., 2018) όπως:

- διαφορετική γωνία θέασης από το ναδίρ (Kyba et al., 2013a· Li et al., 2019· Wang et al., 2020)
- διαφορετικός χρόνος λήψης, μιας και τα φώτα σβήνουν κατά την διάρκεια της νύκτας (Bará et al., 2019· Kyba et al., 2012)
- αβεβαιότητα στην γεωμετρική ακρίβεια στα δεδομένα, η οποία για τα snpp-VIIRS κυμαίνεται από 400 m στο ναδίρ, στα 1.500 m στα ακραία σημεία της σάρωσης (μεγάλη γωνία ( $\theta$ ) από το ναδίρ).
- εποχικές μεταβολές στην χιονοκάλυψη και την βλάστηση (Levin, 2017· Wang et al., 2020)
- ατμοσφαιρικές παράμετροι όπως τα αιωρούμενα σωματίδια (aerosols) (Fu et al., 2018· Wang et al., 2020)
- μετατόπιση των pixel ή διαφορετικά pixels όταν δημιουργούνται composites, ετήσια ή μηνιαία (Elvidge et al., 2017)
- μεταβολές ή σφάλματα στην ευαισθησία λήψης ή την διαβαθμονόμηση του αισθητήρα (Zeng et al., 2018)
- η επίδραση της σεληνιακής ακτινοβολίας (Román et al., 2018· Zeng et al., 2018)
- η επίδραση εποχικών ή προσωρινών φώτων (Román και Stokes, 2015)
- ηλεκτρικές διακοπές ρεύματος λόγω φυσικών καταστροφών ή πολεμικών συρράξεων (Cao et al., 2013· Enenkel et al., 2019· Kohiyama et al., 2004· Li και Li, 2014·

Mann et al., 2016· Román et al., 2019· Witmer και O’Loughlin, 2011· Zhao et al., 2018· Zheng et al., 2019)

- αλλαγές στις τεχνολογίες μόνιμου φωτισμού (μετάβαση σε λαμπτήρες τύπου LED) (Kyba et al., 2017b, 2018)

Συνοψίζοντας σχετικά με την καταλληλότητα των δεδομένων snpp-VIIRS για την ανάλυση του αστικού χώρου και της αστικής δραστηριότητας, η χωρική τους ανάλυση είναι επαρκής να περιγράψει οικονομικά και κοινωνικά φαινόμενα σε επίπεδο ανάλυσης πόλης (Cao και Bai, 2014). Ωστόσο σε λεπτομερέστερο επίπεδο (π.χ. επιπέδου γειτονιάς ή οικοδομικού τετραγώνου) η χωρική διακριτική τους ικανότητα δεν επαρκεί. Το κενό αυτό έρχονται να καλύψουν δεδομένα άλλων δορυφόρων μεγαλύτερης χωρικής διακριτικής ικανότητας (είτε με συστηματικό τρόπο λήψης π.χ. LJ1-01 είτε με μη συστηματικό τρόπος όπως οι φωτογραφίες από τον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, ISS. Επιπλέον η αβεβαιότητα στην γεωμετρική ακρίβεια, καθιστά δύσκολη την συγκριτική διαχρονική μελέτη μεμονομένων φωτεινών πηγών. Το ελάχιστο όριο αναγνώρισης της ακτινοβολίας ( $3 \times 10^{-9} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  βάσει των προδιαγραφών,  $5 \times 10^{-11} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  σε πραγματική τροχία, Cao και Bai, 2014) που μπορεί να καταγράψει ο αισθητήρας είναι εφικτό να αποδώσει μικρές οικιστικές μονάδες και φωτεινές πηγές στον υπαίθρο χώρο.

Τα δεδομένα snpp-VIIRS προσφέρονται σε αρκετά ικανοποιητικό χρονικό βήμα για αστικές μελέτες. Εκτός από τα ετήσια δεδομένα, τα μηνιαία σύνθετα (monthly composites) προσφέρουν ικανοποιητική κάλυψη πλήρους χρονοσειράς από το 2012. Τεχνικό πλεονέκτημα των προαναφερθέντων δεδομένων είναι η άμεση εφαρμογή τους στις έρευνες αστικής φύσεως δεδομένου ότι αυτά έχουν ήδη υποστεί προεπεξεργασία για την αφαίρεση του θορύβου και την εξασφάλιση της αναγκαίας ποιότητας. Ωστόσο η χρήση αυτού του προϊόντος περιλαμβάνει μόνο δεδομένα που είναι ανεπηρέαστα από την σεληνιακή ακτινοβολία και αποκλείει έτσι την μελέτη της επίδρασης φαινομένων και συμβάντων κατά την διάρκεια αυτών των περιόδων.

Όπως προαναφέρθηκε, τα δεδομένα snpp-VIIRS άρχισαν από το 2020 να διατίθενται και σε καθημερινή βάση (δεδομένα “Black Marble”), προεπεξεργασμένα και έτοιμα προς χρήση. Το γεγονός αυτό δίνει την δυνατότητα για έρευνα του αστικού χώρου στην μέγιστη δυνατή χρονική ανάλυση. Το προϊόν αυτό περιλαμβάνει δεδομένα ανεξαρτήτως της φάσης της σελήνης προσφέροντας έτσι την δυνατότητα για πλήρη παρακολούθηση του χώρου και νέες αστικές εφαρμογές. Όμως αυτή η κατηγορία δεδομένων, προς το παρόν, δεν είναι

πλήρως αξιοποιήσιμη γιατί δεν έχει δημοσιευθεί πλήρως η χρονοσειρά τους και η κάλυψη τους δεν είναι ακόμα παγκόσμια (αφορά το προϊόν VNP46A2).

Συγκριτικά με την βασική προϋπάρχουσα πηγή νυχτερινών δεδομένων, DMSP/OLS, τα δεδομένα snrp-VIIRS προσφέρουν πλήρη ραδιομετρική επάρκεια (14 bits), γεγονός που σημαίνει ότι δεν πλήττονται από τον περιορισμό του κορεσμού και αποδίδουν κατά συνέπεια με πλήρη λεπτομέρεια την ποικιλομορφία του αστικού πυρήνα. Το φασματικό τους εύρος (0,5  $\mu\text{m}$ –0,9  $\mu\text{m}$ ) στο ορατό φάσμα καταγράφει σε ικανοποιητικό βαθμό τις φωτεινές πηγές των πόλεων, όχι όμως όλες. Ένα σημαντικό ποσοστό της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, αυτό από τους λαμπτήρες LED (Cao και Bai, 2014· Kyba et al., 2017b), δεν είναι εφικτό να καταγραφεί από τον αισθητήρα snrp-VIIRS γιατί δεν είναι εντός της φασματικής του απόκρισης (βλ. Διάγραμμα 1, σελ. 44).

Δεν παύει όμως να υπάρχει και ο αντίλογος σχετικά με την καταλληλότητα των δεδομένων snrp-VIIRS για την καταγραφή αστικών νυχτερινών φώτων. Ο αισθητήρας είναι κατασκευασμένος για την καταγραφή νεφών (από τον φωτισμό της σεληνιακής λάμψης) και όχι για αστικά φώτα. Η χωρική τους ανάλυση, αν και υψηλότερη από αυτή των DMSP/OLS, δεν είναι αρκετή για να περιγράψει με ευκρίνεια χαρακτηριστικές αστικές δομές ενώ το φασματικό κανάλι που χρησιμοποιείται για χαμηλού φωτισμού εικόνες δεν είναι κατάλληλο για νυχτερινά φώτα (Elvidge et al., 2007)).

Μία άλλη αδυναμία του αισθητήρα snrp-VIIRS είναι η ανεπάρκειά του να καταγράφει πλήρως το αυξημένο πλέον φαινόμενο του τεχνητά φωτεινού ουράνιου θόλου (skyglow), δηλαδή την φωτεινότητα του ουρανού μιας κατοικημένης περιοχής ως αποτέλεσμα της φωτορύπανσης. Το φαινόμενο εντείνεται γιατί αφενός αυξάνεται η μετάβαση σε λαμπτήρες LED και αφετέρου γιατί η ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος αυτών των λαμπτήρων διασκορπίζεται περισσότερο στην ατμόσφαιρα. Οι δε οικολογικές συνέπειες του φαινομένου είναι πιο μεγάλες σε συννεφιασμένες βραδιές (Kyba et al., 2012· Kyba et al., 2011).

Σύμφωνα με τους Elvidge et al. (2007) οι απαιτήσεις σχετικά με τα χαρακτηριστικά ενός δορυφορικού συστήματος καταγραφής αστικών περιοχών επικεντρώνονται στην δυνατότητά τους να μπορούν να αποδώσουν το αστικό αποτύπωμά τους (footprint) (συμπεριλαμβανομένου και των υπό ανάπτυξη/κατασκευή περιοχών) και να αναγνωρίζουν αραιοκατοικημένες αγροτικές περιοχές. Επίσης, μέσω πολυφασματικών καναλιών χαμηλών φώτων, θα πρέπει ενδοαστικά να διακρίνονται επιμέρους χρήσεις γης (όπως εμπορικές, βιομηχανικές και αστικές) και το οδικό δίκτυο. Για να επιτευχθεί αυτό, ο δορυφόρος

συνιστάται να διέρχεται νωρίς το βράδυ, να έχει χωρική ανάλυση 50 m–100 m και όριο αναγνώρισης της τάξεως των  $2,5 \times 10^{-8} \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ . Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά, συμπεραίνουμε ότι ο αισθητήρας VIIRS δεν πληρεί αυτά τα κριτήρια.

## 2.2 ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά προϊόντα νυχτερινών δεδομένων ανάλογα τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και τον στόχο που επιδιώκεται. Πέρα από τα νυχτερινά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν και επιπρόσθετα βοηθητικά δεδομένα για τις ανάγκες της έρευνας. Στην συνέχεια παρατίθενται αναλυτικά τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην διατριβή.

Για την βελτιστοποίηση των δεδομένων DMSP/OLS (NOAA National Geophysical Data Center, 2013) χρησιμοποιήθηκε το προϊόν “Stable Lights” (έκδοση 4) (Baugh et al., 2010) του έτους 2013 κατόπιν διαβαθμονόμησης (Stathakis, 2016b). Η εφαρμογή της μεθόδου βασίστηκε στην χρήση των δεδομένων του ραντάρ μέτρησης οπισθοσκεδάζουσας ακτινοβολίας SeaWinds (Ku-band), 13,4 GHz, που φέρεται από τον δορυφόρο QuikSCAT. Τα δεδομένα οπισθοσκέδασης από το ραντάρ QuikSCAT/SeaWinds έχει αποδειχθεί ότι έχουν συσχέτιση με τον βαθμό της αστικοποίησης (Nghiem et al., 2009).

Ο δορυφόρος της NASA Quick Scatterometer (QuikSCAT), ο οποίος εκτοξεύτηκε στις 19 Ιουνίου 1999, φέρει το όργανο (αισθητήρα) SeaWinds. Ο αισθητήρας είναι σχεδιασμένος για την ακριβή καταγραφή των ωκεάνιων επιφανειακών ανέμων σε κάθε είδους καιρικές συνθήκες, εκτός από μεσαία και υψηλή βροχόπτωση. Είναι ενεργητικός αισθητήρας στο μικροκυματικό κανάλι Ku-band με συχνότητα λειτουργίας 13,4 GHz. Έχει πλάτος σάρωσης (swath) 1.800 km.

Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το προϊόν κάθετης πόλωσης ( $54^\circ$  γωνία πρόσπτωσης) “quev”, πρωϊνής και απογευματινής διέλευσης, που αποφέρει 4-ήμερα σύνθετα (composites) χωρικής διακριτικής ικανότητας 4,45 km. Το προϊόν ανήκει στην κατηγορία μετρήσεων οπισθοσκέδασης “egg” και έχουν λιγότερο θόρυβο. Είναι διαθέσιμα για την περίοδο 1999-2009 (Remote Sensing, 2003). Τα δεδομένα οπισθοσκέδασης  $\sigma_0$  (σε dB) μετατράπηκαν σε power-return-ratio (PR) (Frolking et al., 2013):

$$PR = 10^{\frac{\sigma_0}{10}} \quad (1)$$

Η γεωμετρία των σχημάτων (τεμνόμενες επιφάνειες) σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (κυρίως στο αστικό τοπίο και γενικότερα στις ανθρωπογενείς κατασκευές) είναι δυνατόν να επηρεάσει τον μέγεθος του οπισθοσκεδάζομενου σήματος προς το ραντάρ κατά τρόπο ασύμμετρο ως προς τις διαστάσεις του αντικειμένου-στόχου (Campbell και Wynne, 2011).

Αυτά τα αντικείμενα αποτελούνται από γωνίες (ή περιέχουν επιμέρους γωνιακά χαρακτηριστικά) και απαντώνται σε τσιμεντένιες ή μεταλλικές αστικές κατασκευές (αλλά και σε μεμονωμένες περιπτώσεις στο αγροτικό τοπίο π.χ. σε φάρμες, αγροτικό εξοπλισμό, πυλώνες ηλεκτρικού ρεύματος κτλ.). Εξαιτίας της ιδιαίτερης ανακλαστικής ιδιότητας που διαθέτουν οι γωνιακοί ανακλαστήρες αποτελούν σημαντικό εργαλείο στην φωτοερμηνεία των αστικών τοπίων και στον εντοπισμό προτύπων και χαρακτηριστικών.

Οι Nghiem et al., 2009 χρησιμοποίησαν την μέθοδο Dense Sampling Method (DSM) και δορυφορικά δεδομένα ραντάρ QuikSCAT/Seawinds για να προσδιορίσουν αστικές περιοχές και ενδοαστικούς πυρήνες σε κλίμακα 1 km. Η DSM είναι στατιστική μέθοδος η οποία επιτρέπει την χρήση δεδομένων ραντάρ κάθετης (VV) και οριζόντιας πόλωσης (HH) για να υπολογίσει πιο ευκρινή και υψηλής ανάλυσης δεδομένα μέσω της σύνθεσης από πολλαπλές αζιμουθιακές γωνίες. Στα αστικά περιβάλλοντα, η διάταξη ανθρωπογενών κατασκευών κατά συγκεκριμένη διεύθυνση οδηγεί σε διαφορές στις τιμές των μετρήσεων της οπισθοσκέδασης ανάμεσα σε εμπρόσθια και οπίσθια θέαση σε κάθε τροχιά. Η μέθοδος περιορίζει τις διακυμάνσεις της οπισθοσκέδασης στατικών στόχων λόγω της αζιμουθιακής ασυμμετρίας και των περιβαλλοντικών μεταβολών, τα οποία μαζί με τον θόρυβο δημιουργούν σφάλματα. Τα αποτελέσματα της μεθόδου συνδυάζονται με οικιστικά και πληθυσμιακά δεδομένα, με δορυφορικές εικόνες Landsat Thematic Mapper Plus (ETM+) και με εικόνες νυχτερινών δεδομένων DMSP/OLS. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε κτίρια και υποδομές αντιστοιχούν συγκεκριμένες υπογραφές οπισθοσκέδασης (scatterometer signatures). Επιπλέον διαπιστώθηκε ότι η έκταση των αστικών περιοχών που αποτυπώθηκαν με την μέθοδο DSM είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή που αποδίδουν τα DMSP/OLS, τα οποία πλήττονται από το πρόβλημα της υπερ-λάμψης (overglow).

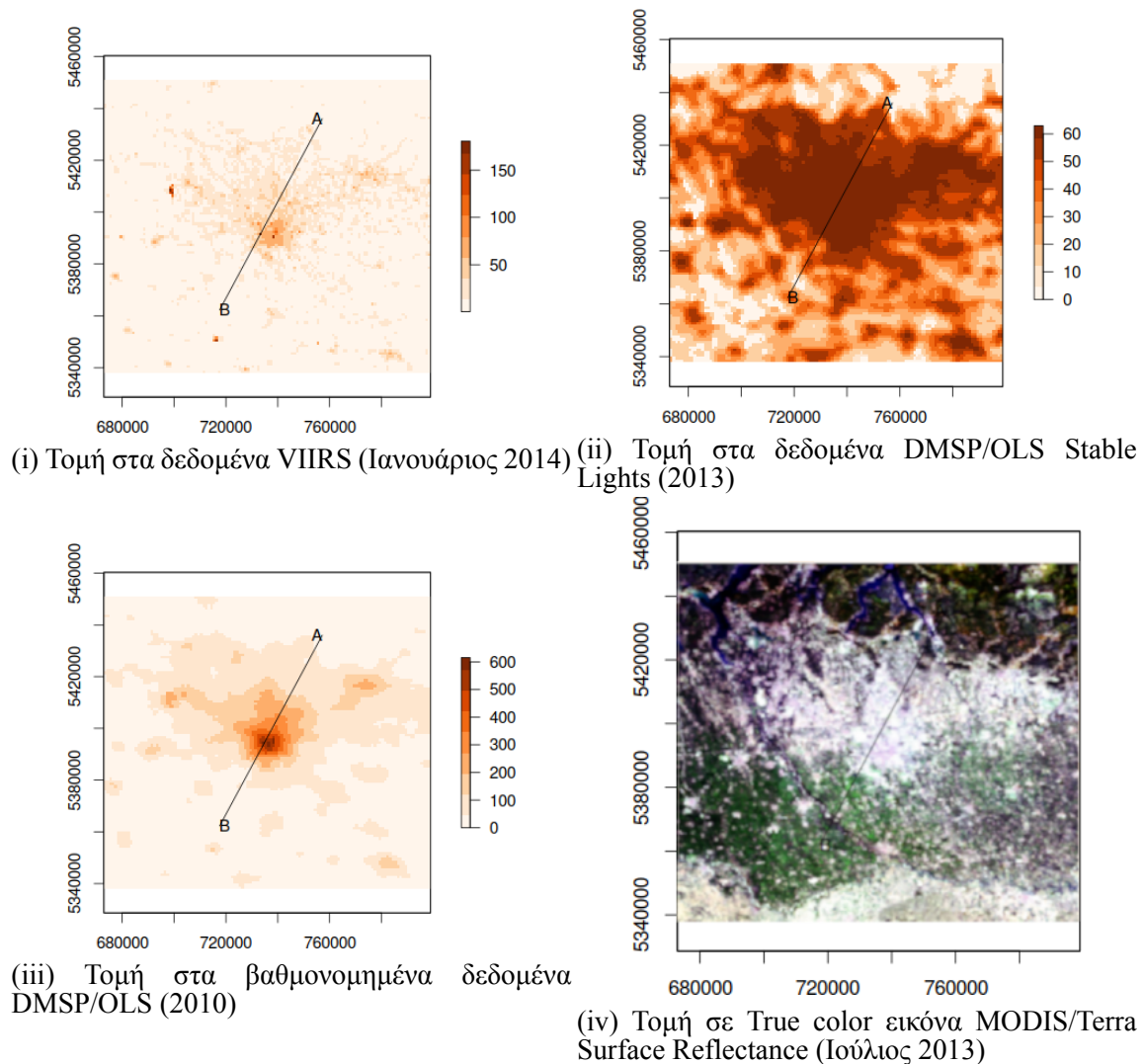
Τα δεδομένα SeaWinds/QuikSCAT σε συνδυασμό με την μέθοδο DSM αποτελούν ικανοποιητική λύση για την διαχρονική μελέτη του αστικού περιβάλλοντος και των αλλαγών του. Με παγκόσμια περιοδική κάλυψη για μια περίοδο που ξεκινάει από το 1999, με ακρίβεια μέτρησης της οπισθοσκέδασης στα 0,2 dB, τα δεδομένα αυτά είναι ικανά να αποτυπώσουν όχι μόνο ταχείας και μεγάλης κλίμακας αλλαγές αλλά και βραδύτερες, μικρότερης κλίμακας. Σε συνδυασμό με την μέθοδο DSM και τον μετασχηματισμό Rosette (πάνω στα πρωτογενή δεδομένα) τα δεδομένα SeaWinds δύναται να ποσοτικοποιήσουν μια σειρά μεταβλητών και παραγόντων του αστικού τοπίου (θέση, σχήμα, έκταση, τυπολογία) σε χωρική ανάλυση 1 km<sup>2</sup> (Stevenazzi et al., 2015).

Επιπλέον κατά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου για την βελτίωση των δεδομένων DMSP/OLS χρησιμοποιήθηκαν τα μέσα ετήσια δεδομένα NDVI για το 2013 (προϊόν MODIS/MOD13A3) και τα δεδομένα θερμοκρασίας επιφάνειας εδάφους LST χωρικής διακριτικής ικανότητας  $1 \times 1$  km (προϊόν MODIS MOD11A2). Η θερμοκρασία της επιφάνειας εδάφους είναι μια μεταβλητή που σχετίζεται με την αστικοποίηση, τα αστικά πρότυπα, το φαινόμενο της αστικής θερμνησίδας (urban heat island) και την κάλυψη γης (Bokaie et al., 2016· Jaber, 2020· Stamou και Patias, 2014· Wang et al., 2017).

Για την αξιολόγηση και τον έλεγχο της εγκυρότητας (validation) της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν τα:

- δεδομένα διαβαθμονομημένης ακτινοβολίας DMSP/OLS (Hsu et al., 2015) για το 2010 (αρχείο F16\_20100111-20101209\_rad\_v4)
- μηνιαία σύνθετα VIIRS για τον Ιανουάριο 2014 (NOAA, 2016), διορθωμένα από το αδέσποτο φως (προϊόν “vcmsl”, stray-light corrected) (Mills et al., 2013).

Στα δεδομένα έγινε αναδειγματοληψία (resample) με την μέθοδο του κοντινότερου γείτονα (nearest-neighbor) σε  $1 \times 1$  km στο προβολικό σύστημα *Mollweide*. Ενδεικτικά τα δεδομένα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 2 και σε τρισδιάστατη αναπαράσταση (βλ. Εικόνα 12) για το Μιλάνο.



Διάγραμμα 2: Το Μιλάνο όπως καταγράφεται στις πηγές δεδομένων (VIIRS-Ιαν. 2014, DMSP/OLS Stable Lights-2013, διαβαθμονομημένα DSMP/OLS-2010) και σε εικόνα true color MODIS (Ιούλιος 2013-500 m). (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019a).

Επειδή τα δεδομένα δεν ήταν όλα διαθέσιμα για το 2013 χρησιμοποιήθηκαν οι πλησιέστερες διαθέσιμες ημερομηνίες, εισάγοντας με αυτόν τον τρόπο έναν βαθμό ασυμβατότητας, ειδικά σε περιοχές ταχείας αστικοποίησης. Ωστόσο, επειδή οι χρονικές διαφορές των πηγών δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλες ούτε οι ρυθμοί αστικοποίησης στις περιοχές μελέτης είναι πολύ υψηλοί, μικρή επιρροή έχουν στον έλεγχο της εγκυρότητας. Η προτεινόμενη μέθοδος δοκιμάστηκε σε 10 αστικές περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά βλάστησης και βαθμό αστικοποίησης (βλ. Χάρτη 6, ενότητα 2.3).

Τα δεδομένα νυχτερινής ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται για την διόρθωση της επίδρασης της σεληνιακής ακτινοβολίας με την μέθοδο *Dark Object Substraction* και την μέθοδο αντανakλαστικότητα της ακτινοβολίας *BRDF* είναι τα VIIRS Day Night Band SDR (SVDNB) (με χωρική διακριτική ικανότητα 742 x 742 m, και μήκος κύματος 0,5  $\mu\text{m}$ –



0,9  $\mu\text{m}$  και τα VIIRS Day Night Band SDR Ellipsoid Geolocation (GDNBO).

Η λήψη δεδομένων νυχτερινών εικόνων σε ημερήσια βάση γίνεται από τον διαδικτυακό τόπο Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS) (NOAA, 2018).

Επιπλέον, τα σύνολα δεδομένων VIIRS Cloud Mask EDR (VICMO)/VIIRS Moderate Bands SDR Geolocation (GMODO) αξιοποιούνται για την εφαρμογή των απαραίτητων φίλτρων (Cloud Detection Confidence Pixel, Snow/Ice Surface, and Fire). Και στις δύο περιπτώσεις τα δεδομένα παραγγέλθηκαν με ενσωματωμένα τα αντίστοιχα geolocation files (αρχεία GDNBO, GMODO). Διατίθενται σε μορφή HDF και αφορούν την περίοδο 03 Σεπτεμβρίου 2017 - 31 Δεκεμβρίου 2018.

Τα σύνολα δεδομένων (datasets) που εξήχθησαν από τα αρχεία SDR είναι:

- Radiance, που περιλαμβάνει την ακτινοβολία σε  $\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ .

Τα σύνολα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν από τα αρχεία EDR είναι:

- Cloud Detection Confidence Pixel mask
- Snow/Ice Surface mask
- Fire mask

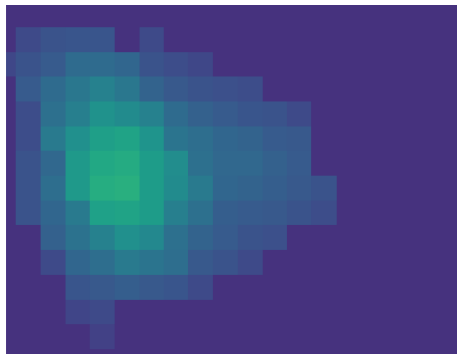
Πιο συγκεκριμένα, για τα νυχτερινά δεδομένα ακολουθήθηκε μια διαδικασία προεπεξεργασίας που αφορά την αφαίρεση των νεφών με την χρήση των βοηθητικών δεδομένων VIIRS Environmental Data Record (EDR), τα οποία είναι διαθέσιμα ανά 12 περίπου ώρες με χωρική διακριτική ικανότητα 750 m στο ναδίρ. Τα νέφη αφαιρέθηκαν με την απόρριψη των pixel που δεν είναι επισημασμένα ως "confidently clear or probably clear" (CloudDetection Confidence Pixel mask) (Cole et al., 2017· Mann et al., 2016). Ακόμα, έγινε διόρθωση του χαρακτηριστικού προβλήματος bow-tie effect όπου τα pixel μεγεθύνονται στα άκρα της λωρίδας σάρωσης (edge-of-swath) κατά τις διαδοχικές σαρώσεις (Seaman et al., 2015). Η διόρθωση έγινε με την εφαρμογή αναδειγματοληψία εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor resampling) με ακτίνα 2 km.

Κατά την μετατροπή των αρχείων από hdf σε geotiff εφαρμόστηκαν φίλτρα (masking) με βάση τα απαραίτητα Quality flags (JPSS Ground System, 2015, JPSS Ground System, 2016) για την εξαγωγή των καταλληλότερων (από ποιοτικής άποψης) δεδομένων. Εφαρμόστηκαν ποιοτικά flags που απορρίπτουν pixel επισημασμένα ως Missing Data, Saturated

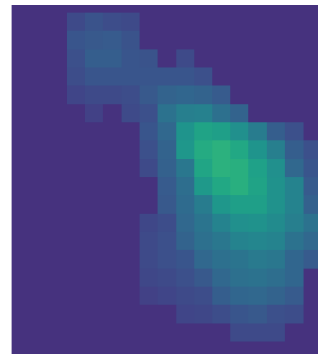
Pixel, Out of Range, Snow/Ice Surface (Levin, 2017· Wu et al., 2018), Fire mask, Pixel-level quality flag (Invalid Input Data, Bad Pointing, Bad Terrain, Invalid Solar Angles) (JPSS Ground System, 2015, 2016· NOAA, 2017) και out edge-of-swath pixels (aggregation zones 29-32) (Baugh et al., 2013· Cole et al., 2017· Zhao et al., 2018). Για την ανάγνωση των αρχείων HDF, την μετατροπή τους σε geotiff, την αποκοπή των δεδομένων στα όρια της περιοχής μελέτης και την προβολή τους στο ΕΓΣΑ'87 χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη της Python, satpy (SatPy, 2018). Η εφαρμογή των επιμέρους μασκών έγινε μέσω της python βιβλιοθήκης numpy (Logical OR) ενώ η διόρθωση των bow-tie deletion pixels έγινε μέσω της βιβλιοθήκης pyresample. Τα τελικά δεδομένα έχουν χωρική διακριτική ικανότητα (resolution) 750m.

Στην εφαρμογή της μεθόδου *Median Shift* χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα νυχτερινών φώτων VIIRS Level 3 Black Marble, daily at-sensor top of atmosphere (TOA) nighttime radiance product (VNP46A1), Daily Gridded 500m data (Román et al., 2018) με μήκος κύματος 0.5 – 0.9  $\mu\text{m}$ . Κατά την προεπεξεργασία των δεδομένων εφαρμόστηκαν φίλτρα που αφορούν την αφαίρεση των νεφών (QF\_Cloud\_Mask) ή την ποιότητα τους (QF\_DNB). Επιπλέον, όσα pixels σαρώθηκαν τις προ-μεσημβρινές ώρες (π.χ. 01:30 πμ) θεωρήθηκαν δεδομένα προηγούμενης βραδιάς.

Για το υπολογισμό του δείκτη φωτορύπανσης απαιτούνται δεδομένα νυχτερινών φώτων και ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Για την εκπόνηση της έρευνας χρησιμοποιήσαμε βαθμονομημένα δεδομένα DMSP/OLS (Stathakis, 2016b) διακριτικής ικανότητας 1000m, μηνιαία δεδομένα snpp-VIIRS (NOAA, 2016) διακριτικής ικανότητας 750m (βλ. Εικόνες 6 και 7) και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), διακριτικής ικανότητας 90m (Farr et al., 2007). Σε όλα τα δεδομένα έγινε αναδειγματοληψία (resample) στα 100m.

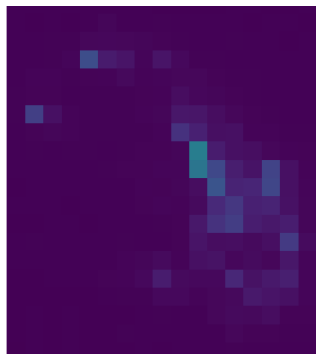


(i) Μύκονος

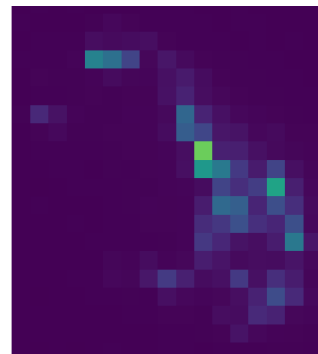


(ii) Σαντορίνη

Εικόνα 6: Δορυφορικές εικόνες DMSP/OLS 2013 για την Μύκονο και Σαντορίνη. (Πηγή: Stathakis et al., 2018).

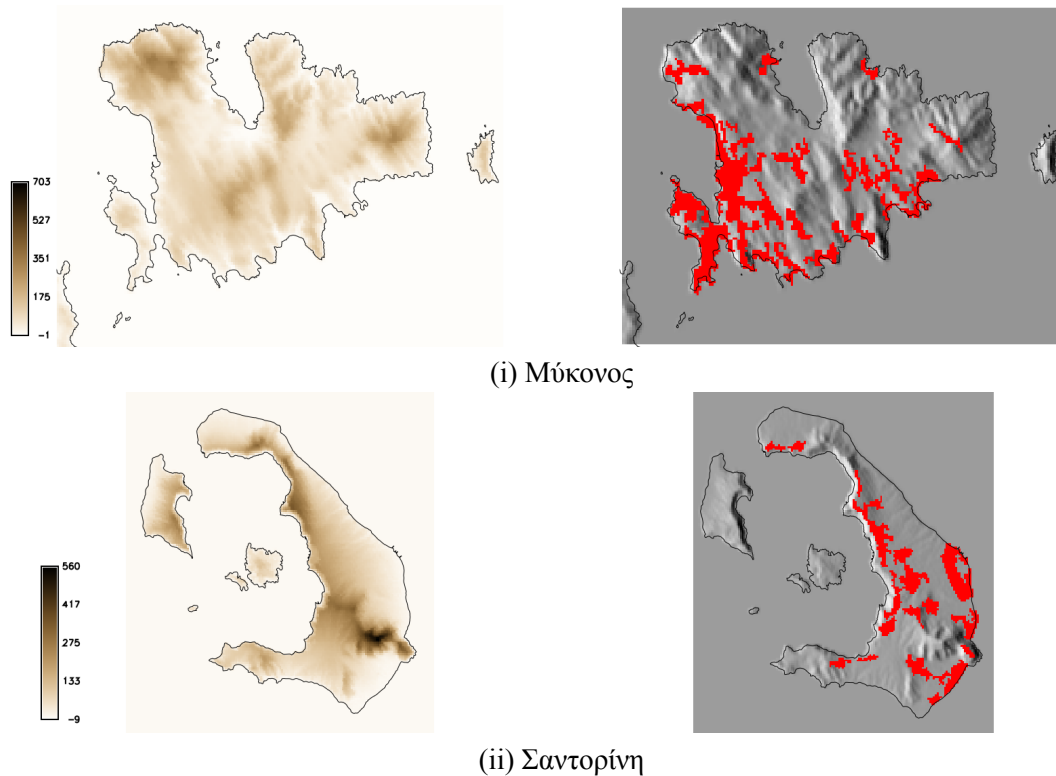


(i) Φεβρουάριος, 2017



(ii) Αύγουστος, 2017

Εικόνα 7: Δορυφορικές εικόνες snpp-VIIRS 2017 για την Σαντορίνη. (Πηγή: Stathakis et al., 2018).



Χάρτης 2: Ψηφιακό μοντέλο και ανάγλυφο εδάφους με αστικές περιοχές (Corine 2012) για τις νήσους Μύκονος και Σαντορίνη. (Πηγή: Stathakis et al., 2018).

Για την πρόβλεψη της χρονοσειράς DMSP/OLS χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα για τα έτη 1992-2013 των νυχτερινών φωτών Global DMSP/OLS Nighttime Lights Time Series 1992 – 2013, Version 4 (NOAA National Geophysical Data Center, 2013). Προηγήθηκε διαβαθμονόμηση των δεδομένων σύμφωνα με τον τρόπο που προτείνεται από τον Elvidge (Elvidge et al., 2009b· Elvidge et al., 2014). Η διόρθωση έγινε με βάση το πολυώνυμο:

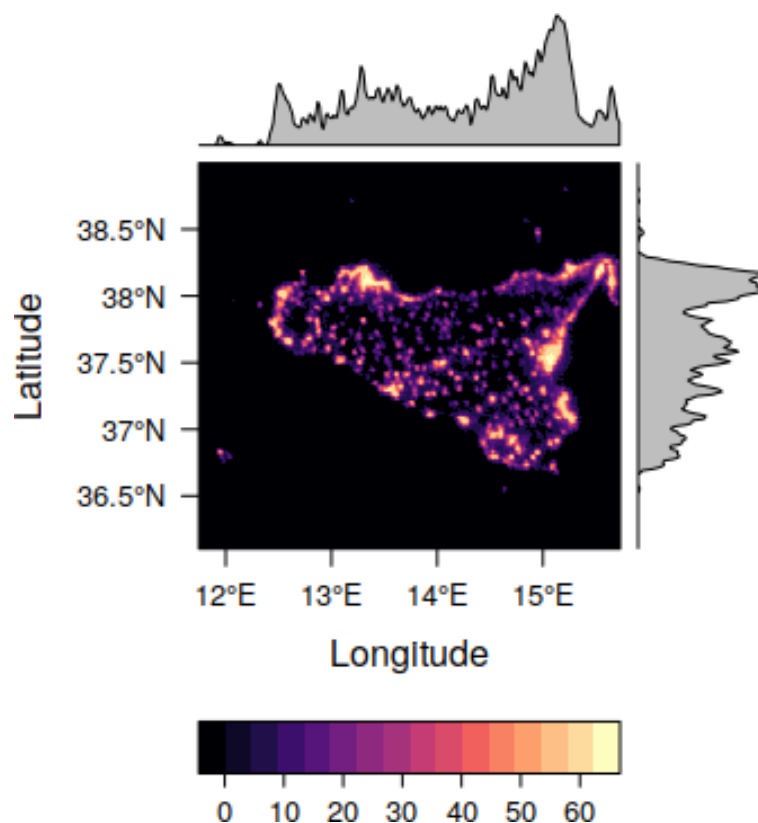
$$Y = C_0 + C_1X + C_2X^2 \quad (2)$$

Όπου  $X$  είναι ο μέσος όρος του ψηφιακού αριθμού (DN) του ορατού καναλιού (average of the visible band digital number) και  $Y$  είναι η διορθωμένη τιμή του.

Οι συντελεστές μετατροπής που παρέχονται για την διαβαθμονόμηση είναι στο [https://ngdc.noaa.gov/eog/pubs\\_new.html](https://ngdc.noaa.gov/eog/pubs_new.html) (βλ. αρχείο coefficients.csv).

Επειδή για το 2013 δεν παρέχονται συντελεστές από το σχετικό αρχείο, υπολογίστηκαν με την μέθοδο παλινδρόμησης β' βαθμού (Elvidge et al., 2009b· Elvidge et al., 2014). Το αρχείο *F121999.v4b\_web.stable\_lights.avg\_vis.tif* χρησιμοποιήθηκε σαν εικόνα αναφοράς και η Σικελία ως περιοχή αναφοράς (βλ. χάρτης 10).

Ο υπολογισμός των συντελεστών έγινε με την προσαρμογή μοντέλου παλινδρόμησης πολυωνύμου β' βαθμού.



Εικόνα 8: Διορθωμένη εικόνα Stable Lights (v4) DMSP/OLS με τους συντελεστές μετατροπής του Elvidge. (Πηγή: ιδία επεξεργασία).

Για λόγους επαλήθευσης της ορθότητας του υπολογισμού, οι συντελεστές υπολογίστηκαν για όλα τα έτη (βλ. Πίνακα 5).

C0	C1	C2	FILENAME
-0.00029	1.35018	-0.00512	F101992.v4b
-0.19015	1.45131	-0.00666	F101993.v4b
0.02623	1.42455	-0.00679	F101994.v4b
0.13889	1.08706	-0.00111	F121994.v4b
-0.00924	1.19681	-0.00312	F121995.v4b
0.09104	1.23672	-0.00338	F121996.v4b
-0.00623	1.11792	-0.00154	F121997.v4b
-0.02107	1.03366	-0.00065	F121998.v4b
0.00000	1.00000	0.00000	F121999.v4b
-0.03755	1.61514	-0.00946	F141997.v4b
0.03658	1.59258	-0.00935	F141998.v4b

συνέχεια στην επόμενη σελίδα

συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα

C0	C1	C2	FILENAME
-0.10148	1.46781	-0.00704	F141999.v4b
0.05825	1.39872	-0.00649	F142000.v4b
-0.04517	1.31844	-0.00493	F142001.v4b
0.09953	1.25873	-0.00455	F142002.v4b
-0.02255	1.28846	-0.00458	F142003.v4b
-0.13003	1.01915	-0.00035	F152000.v4b
-0.09168	1.02080	0.00026	F152001.v4b
-0.02788	0.93804	0.00141	F152002.v4b
-0.08036	1.50536	-0.00767	F152003.v4b
0.04560	1.36204	-0.00547	F152004.v4b
-0.06775	1.32144	-0.00462	F152005.v4b
-0.01888	1.33615	-0.00485	F152006.v4b
0.13149	1.40443	-0.00619	F152007.v4b
0.02698	1.18449	-0.00309	F162004.v4b
-0.11376	1.38973	-0.00569	F162005.v4b
0.02784	1.12237	-0.00129	F162006.v4b
0.02982	0.94328	0.00101	F162007.v4b
0.03871	1.01674	-0.00024	F162008.v4b
0.21733	1.11629	-0.00218	F162009.v4b
0.16292	0.65619	0.00453	F182010.v4d
0.14571	0.86330	0.00128	F182011.v4c
0.09967	0.75082	0.00337	F182012.v4c
0.10585	0.82692	0.00177	F182013.v4c

Πίνακας 5: Συντελεστές εξίσωσης β' βαθμού για την διαβαθμονόμηση των δεδομένων DMSP/OLS. (Πηγή: ιδία επεξεργασία).

Στην συνέχεια έγινε ο υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισης Pearson ( $\rho$ ) των διορθωμένων εικόνων με τους συντελεστές του Elvidge και των διορθωμένων εικόνων με τους συντελεστές που προέκυψαν από την παλινδρόμηση. Σε όλες τις περιπτώσεις η συσχέτιση ήταν πολύ ισχυρή ( $\rho \sim 1.00$ ). Τα αποτελέσματα της συσχέτισης είναι:

filename	pearson	filename	pearson
F101992.v4b	0,99068	F152001.v4b	0,99510
F101993.v4b	0,99974	F152002.v4b	0,99997

συνέχεια στην επόμενη σελίδα

συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα

filename	pearson	filename	pearson
F101994.v4b	0,99994	F152003.v4b	0,99357
F121994.v4b	0,99992	F152004.v4b	0,99995
F121995.v4b	0,99341	F152005.v4b	0,99992
F121996.v4b	0,99998	F152006.v4b	0,99990
F121997.v4b	0,99994	F152007.v4b	0,99357
F121998.v4b	0,99995	F162004.v4b	0,99434
F121999.v4b	1,00000	F162005.v4b	0,99995
F141997.v4b	0,99027	F162006.v4b	0,99998
F141998.v4b	0,99998	F162007.v4b	0,99583
F141999.v4b	0,99996	F162008.v4b	0,99995
F142000.v4b	0,99341	F162009.v4b	0,99526
F142001.v4b	0,99997	F182010.v4d	0,99167
F142002.v4b	0,99987	F182011.v4c	0,99526
F142003.v4b	0,99990	F182012.v4c	0,99579
F152000.v4b	0,99484		

Πίνακας 6: Συντελεστής συσχέτισης Pearson των συντελεστών διόρθωσης. (Πηγή: ιδία επεξεργασία).

Για την εκτίμηση του ΑΕΠ των στατιστικών μονάδων NUTS 3 εκτελέστηκε πρόβλεψη με γραμμική παλινδρόμηση με ετήσια δεδομένα ΑΕΠ (2014, 2015, 2016, 2017) από την στατιστική υπηρεσία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (Eurostat, Regional Economic Accounts/ Gross domestic product (GDP) at current market prices by NUTS 3 regions) και του ετήσιου δείκτη Sum of Lights (SoL) των νυχτερινών φώτων snpp-VIIRS (Monthly Cloud-free DNB Composite Version 1) των NUTS 3.

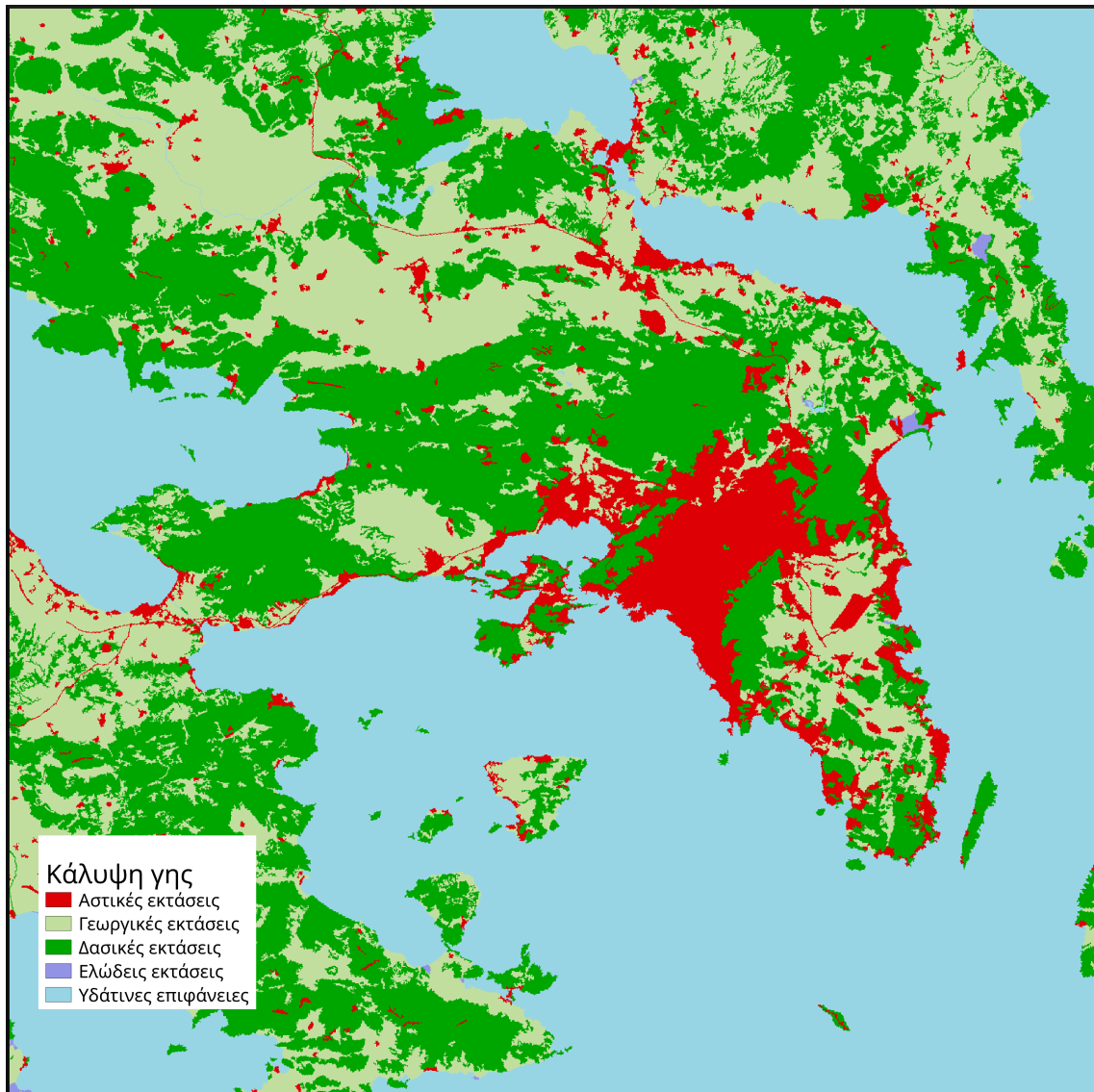
Για την βαθμονόμηση και εκτέλεση του μοντέλου SLEUTH απαιτείται μια σειρά θεματικών επιπέδων:

- η τοπογραφία και πιο συγκεκριμένα η κλίση του εδάφους, η οποία αποτελεί καθοριστικό περιοριστικό παράγοντα στην αστική εξάπλωση. Χρησιμοποιήθηκαν παράγωγα δεδομένα από τα δεδομένα NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second V003 (Farr et al., 2007).
- η κάλυψη γης (αστικές περιοχές, βοσκότοποι, δάσικες εκτάσεις, ελώδεις εκτάσεις, υδάτινες επιφάνειες). Τα δεδομένα αφορούν τα έτη 2006, 2012 και προέρχονται από

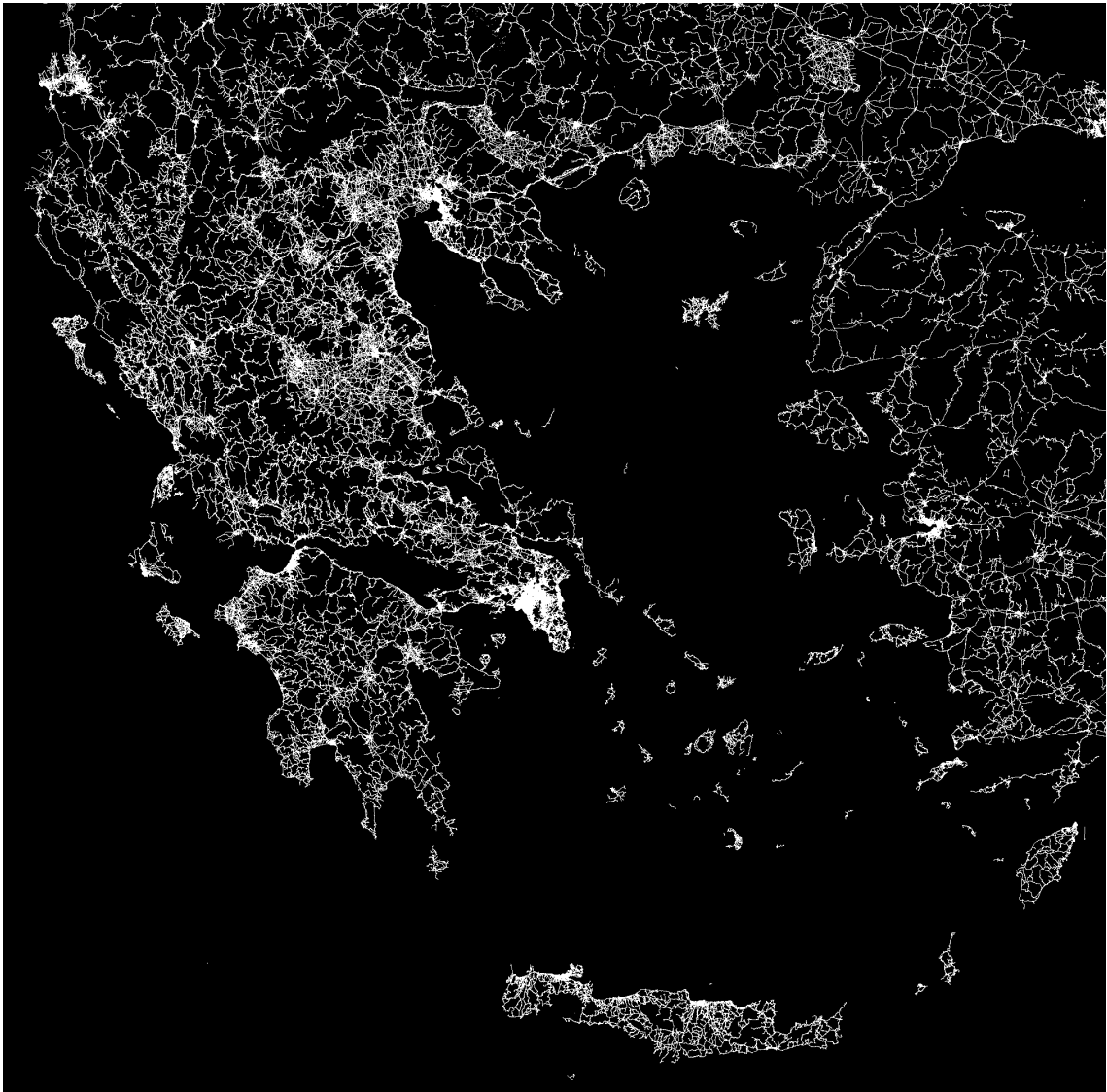
το CORINE Land Cover (CLC) (European Environment Agency, 2018). Συγχωνεύθηκαν με βάση την κατηγοριοποίηση του προτείνεται από το μοντέλο SLEUTH (βλ. ενδεικτικά για την Αττική Χάρτη 3)

- οι περιοχές οι οποίες είναι «ανθεκτικές» στην αστική εξάπλωση (π.χ. υδάτινες επιφάνειες ή εθνικά πάρκα). Τα δεδομένα εισόδου προέκυψαν από φιλτράρισμα των δεδομένων CORINE Land Cover.
- η έκταση των αστικών περιοχών για τέσσερις τουλάχιστον χρονικές στιγμές. Χρησιμοποιήθηκαν διαβαθμονομημένα δεδομένα νυχτερινών φωτών DMSP/OLS (NOAA National Geophysical Data Center, 2013) “Stable Lights” (έκδοση 4) (Baugh et al., 2010) για τα έτη 1992, 1994, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012. Επειδή τα δεδομένα DMSP/OLS πάσχουν από το φαινόμενο της υπερλάμψης (overglow) έχει εφαρμοστεί τεχνική thresholding (Imhoff et al., 1997a) και καθολικό φίλτρο με το οποίο διατηρούνται μόνο οι τιμές με  $DN > 30$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μικρές αστικές περιοχές να εξαιρούνται από την ανάλυση.
- το οδικό δίκτυο για δύο τουλάχιστον χρονικές στιγμές (2008, 2012). Χρησιμοποιήθηκε το οδικό δίκτυο OSM (OpenStreetMap contributors, 2019). (βλ. χάρτης 4).
- η σκίαση του εδάφους, η οποία χρησιμοποιείται για την οπτική βελτίωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του μοντέλου. Χρησιμοποιήθηκαν παράγωγα από τα δεδομένα NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3 arc second V003 (Farr et al., 2007).





Χάρτης 3: Η κάλυψη γης στην Αττική, έτος 2012. Δεδομένα Corine Land Cover κατηγοριοποιημένα για το μοντέλο SLEUTH. (Πηγή: European Environment Agency, 2018 ,ιδία επεξεργασία).



Χάρτης 4: Το οδικό δίκτυο OSM, έτος 2012. Δεδομένα εισόδου για το μοντέλο SLEUTH. (Πηγή: OpenStreetMap contributors, 2019).

Για την έρευνα των έκτακτων συνθηκών στην αστική δραστηριότητα, χρησιμοποιήθηκαν τα μηνιαία σύνθετα δεδομένων νυχτερινών φώτων VIIRS DNB Cloud-Free monthly composites (NOAA, 2016), διορθωμένα από το αδέσποτο φως (stray light corrected), από τον Ιανουάριο του 2017 ως τα πιο πρόσφατα διαθέσιμα, του Ιουνίου του 2020. Αφαιρέθηκε ο θόρυβος δηλ. δεδομένα που θεωρούνται μη αστικά και έχουν τιμές ακτινοβολίας  $<6 \text{ nW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ .

Στην ανάλυση για τα πρότυπα μετακίνησης και την διακύμανση της αστικής δραστηριότητας χρησιμοποιήθηκαν τα ημερήσια δεδομένα από το προϊόν snpp-VIIRS “Black Marble” VNP46A2 (Román et al., 2018) για τα έτη 2019 και 2020. Όπως προαναφέρθηκε το προϊόν διατίθεται απαλλαγμένο από την επίδραση της σεληνιακής ακτινοβολίας, έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες αλλοίωσης των δεδομένων σε σχέση με τις

ανάγκες της έρευνας. Τα ημερήσια δεδομένα Black Marble έχουν υποστεί περαιτέρω επεξεργασία για την αφαίρεση του θορύβου και των μη αστικών περιοχών με το φιλτράρισμα των κελιών με τιμές ακτινοβολίας  $< 6 \text{ nW cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ . Επιπλέον εφαρμόστηκαν όλες οι απαραίτητες σημάνσεις (flags) για την εξασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων (QF\_DNB flag), την εξαίρεση των κελιών με νέφη (QF\_Cloud\_Mask), την χιονοκάλυψη, την σκίαση και την διαφοροποίηση στεριάς και θάλασσας.

Από την εφαρμογή των προαναφερθέντων τιμών επισήμανσης προέκυψαν ημερήσιες εικόνες με κενές περιοχές οι οποίες επηρεάζουν τα μετρικά που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση κατά μη συστηματικό τρόπο. Για την βελτίωση των δεδομένων και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, τα ημερήσια δεδομένα συγχωνεύθηκαν σε εβδομαδιαία και σε μηνιαία σύνθετα. Αν και μηνιαία δεδομένα παρέχονται ήδη από το προϊόν VIIRS DNB Cloud-Free Composites, η δημιουργία μηνιαίων σύνθετων από τα δεδομένα “Black Marble” έχει σαν κύριο πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιούνται δεδομένα χωρίς να εξαιρούνται ημέρες με σελήνη (όπως συμβαίνει στο πρώτο προϊόν).

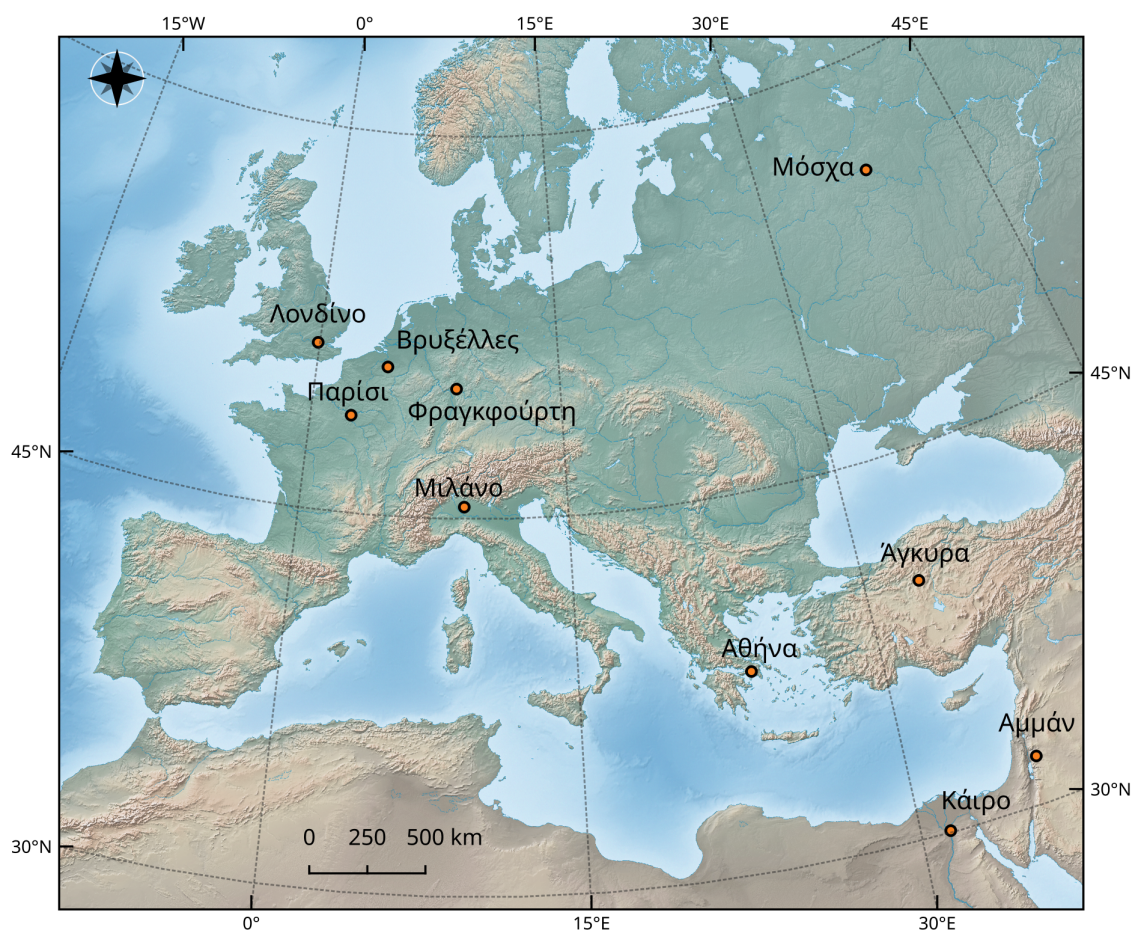
Οι ψηφίδες (tiles) που διανέμονται τα δεδομένα “Black Marble” VNP46A1/A2 δίδονται ανά ημερομηνία και ενδέχεται τμήμα της περιοχής να έχει σαρωθεί τις προ-μεσημβρινές ώρες (π.χ. στις 01:00) και το υπόλοιπο τμήμα τις μεταμεσημβρινές ώρες (π.χ. στις 23:00). Στην παρούσα έρευνα, τα τμήματα της περιοχής που σαρώθηκαν τις προ-μεσημβρινές ώρες θεωρούνται δεδομένα που αφορούν την αστική δραστηριότητα της προηγούμενης βραδιάς.

## 2.3 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Οι περιοχές μελέτης στις οποίες επικεντρώνεται η έρευνα μεταβάλλονται ανάλογα με τις ανάγκες της.

Βασική περιοχή μελέτης της έρευνας είναι η Ελλάδα με βασικότερα πεδία εφαρμογής των πειραμάτων/δοκιμών την Αθήνα και συγκεκριμένα νησιά. Επιπλέον, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις (για λόγους σύγκρισης ή συγκεκριμένων ιδιοτήτων) οι περιοχές μελέτης είναι και αστικά κέντρα εκτός Ελλάδας.

Στην περίπτωση της διόρθωσης των δεδομένων DMSP/OLS χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της εγκυρότητας (validation) πόλεις με διαφορετικά χαρακτηριστικά βλάστησης και αστικής πυκνότητας. Όπως φαίνεται στον Χάρτη 5, πρόκειται για ευρωπαϊκές και μεσογειακές πόλεις (Αθήνα, Άγκυρα, Αμμάν, Βρυξέλλες, Κάιρο, Λονδίνο, Μιλάνο, Μόσχα, Παρίσι, Φραγκφούρτη).



Χάρτης 5: Οι πόλεις που χρησιμοποιήθηκαν στην μέθοδο για την βελτίωση των δεδομένων DMSP/OLS (Πηγή δεδομένων: *Natural Earth-Free Vector and Raster Map Data at 1:10m, 1:50m, and 1:110m Scales 2009–2021*, ίδια επεξεργασία).

Η Άγκυρα (5,1 εκατ. κατ.) είναι πρωτεύουσα της Τουρκίας και εντοπίζεται στα ΒΔ της

Περιοχή	Πληθυσμός (εκατ.)	Μέσο υψόμετρο (m)	Κλίμα
Άγκυρα	5,1	938	Ηπειρωτικό Ημίξηρο ψυχρό
Αθήνα (μαζί με Πειραιά)	3,8	280	Μεσογειακό
Άμμαν	4,0	850	Ημίξηρο θερμό στα όρια με ψυχρό
Βρυξέλλες (μητρ.περ.)	2,1	13	Εύκρατο ωκεάνιο
Καίρο	6,7	23	Θερμές έρημοι
Λονδίνο (μητρ.περ.)	8,9	11	Εύκρατο ωκεάνιο
Μιλάνο (μητρ.περ.)	8,0	120	Υποτροπικό υγρό κλίμα
Μόσχα	12,5	156	Ηπειρωτικό υγρό εύκρατο
Παρίσι (μητρ.περ.)	12,0	35	Εύκρατο ωκεάνιο
Φραγκφούρτη	2,3	112	Εύκρατο ωκεάνιο

Πίνακας 7: Οι περιοχές μελέτης που χρησιμοποιήθηκαν στην βελτίωση των δεδομένων DMSP/OLS και τα χαρακτηριστικά τους. (Πηγή: Wikipedia και ίδια επεξεργασία).

χώρας, 200km νότια της Μαύρης Θάλασσας. Το κλίμα της είναι ηπειρωτικό ημίξηρο ψυχρό. Αποτελεί ένα από τα κυριότερα εμπορικά κέντρα της Τουρκίας και διαμετακομιστικό κέντρο. Ο πληθυσμός της πόλης έχει αυξηθεί ραγδαία (x100) από το 1920 και η έκταση της πόλης έχει αυξηθεί από 250 ha σε 80.000 ha (Baris et al., 2010). Η πόλη μέχρι το 1970 έχει μια σταθερή ανάπτυξη και αστικοποίηση ενώ από το 1980 γεωγραφικά επεκτείνεται ακόμη περισσότερο. Αποτέλεσμα αυτής της ταχείας ανάπτυξης είναι η άναρχη δόμηση, η υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και η περιβαλλοντική υποβάθμιση.

Η Αθήνα, πρωτεύουσα και μεγαλύτερη πόλη της Ελλάδας, αποτελεί το οικονομικό, πολιτικό και πολιτιστικό κέντρο της χώρας. Η Αθήνα βρίσκεται στην περιφέρεια Αττικής στην ανατολική Στερεά Ελλάδα. Το πολεοδομικό συγκρότημα, Αθηνών-Πειραιά έχει πληθυσμό σχεδόν 4 εκατ. κατοίκους, 35 δήμους και έκταση 412 km<sup>2</sup>. Ο μεγαλύτερος δήμος είναι ο δήμος Αθηναίων (664046 κατ.) Είναι η έβδομη κατά μέγεθος πληθυσμού πόλη στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η Αθήνα περικλείεται από τα βουνά του Αιγάλεω, της Πάρνηθας, της Πεντέλης και του Υμηττού. Το κλίμα της είναι εύκρατο μεσογειακό αλλά με μεγάλο θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ καλοκαιριού και χειμώνα. Οι χιονοπτώσεις είναι σπάνιες αλλά οι ακραίες θερμοκρασίες το καλοκαίρι είναι συχνό φαινόμενο με αποτέλεσμα να είναι από τις πιο θερμές πόλεις της Ευρώπης. Μεταπολεμικά η πόλη γνώρισε ραγδαία αύξηση του πληθυσμού αποτέλεσμα της αγροτικής εξόδου, της βιομηχανικής ανάπτυξης, της ανόδου του τριτογενή τομέα και της εγκατάστασης νέων εποίκων. Έτσι κατά την περίοδο 1960-1980 ο πληθυσμός της πόλης διπλασιάστηκε και η πόλη επεκτάθηκε προς τις παρυφές με παράλληλη αύξηση του δομημένου χώρου. Η αύξηση του πληθυσμού είχε σαν αποτέ-

λεσμα την ασύδοτη οικοδομική δραστηριότητα με ολέθριες συνέπειες στο αστικό τοπίο και την λειτουργία της πόλης. Η Αθήνα κυριαρχεί πληθυσμιακά και οικονομικά επί των άλλων ελληνικών πόλεων, τάση η οποία θα αρχίσει να εξισορροπείται με την «τριτογεννοποίηση» της οικονομίας και την αποβιομηχάνιση της δεκαετίας του '80. Η σύγχρονη Αθήνα είναι μια πόλη που μαστίζεται από υπερ-συγκεντρωτισμό και έντονα περιβαλλοντικά προβλήματα.

Το Αμμάν είναι πρωτεύουσα και μεγαλύτερη πόλη της Ιορδανίας και αποτελεί το οικονομικό, πολιτικό και πολιτιστικό κέντρο της χώρας. Η πόλη είναι χτισμένη σε λοφώδες έδαφος σε υψόμετρο 850 m στα ανατολικά όρια του Τζέμπελ Ατζλούν ('Ajlūn) και στις όχθες του ποταμού Ουάντι Αμμάν (Wadi 'Ammān). Ο πληθυσμός του Αμμάν άρχισε να αυξάνεται ραγδαία λόγω πολεμικών συρράξεων. Έτσι, ενώ το 1920 κυμαίνονταν στις 2.000-3.000 κατοίκους, μετά τον πόλεμο των έξι ημερών το 1967 ο πληθυσμός του αγγίζει τις 600.000 κατοίκους το 1976. Μετά τον πόλεμο του 1973 και τον πόλεμο του Κουβέιτ το 1995 έφτασε το 1,15 εκατ. Πλέον η πόλη αριθμεί 4 εκατ. κατοίκους. Το κλίμα του είναι θερμό και ξηρό με παρατεταμένα θερμά και ξηρά καλοκαίρια και σύντομους και ψυχρούς χειμώνες. Κλιματολογικά επηρεάζεται από τις υποτροπικές ξηρές αραβικές ερήμους και το υγρό υποτροπικό κλίμα της μεσογείου θάλασσας. Το Αμμάν είναι μια ταχέως αναπτυσσόμενη πόλη και αποτελεί μια μοντέρνα μεγα-πόλη στον αραβικό κόσμο με πολλά αντιφατικά χαρακτηριστικά όπως έντονη κοινωνική και χωρική πόλωση (Potter et al., 2009), υψηλή παραοικονομία και ανεργία από την μία και υψηλές ξένες επενδύσεις και εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό από την άλλη.

Οι Βρυξέλλες είναι η πρωτεύουσα του Βελγίου και διοικητικό κέντρο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Γεωγραφικά βρίσκεται στο κέντρο του Βελγίου στην πεδιάδα της Βραβάντης, με κλίμα εύκρατο μεσογειακό και μέσο υψόμετρο 13 m. Με πληθυσμό 1,2 εκατ. κατοίκους (και μητροπολιτικό πληθυσμό 2,1) είναι από τις πιο πλούσιες και πυκνοκατοικημένες περιοχές του Βελγίου. Αποτελεί ισχυρό διοικητικό, και οικονομικό κέντρο με γεωστρατηγική θέση και είναι κόμβος οδικών και σιδηροδρομικών αρτηριών. Κατατάσσεται στα πιο ισχυρά χρηματοοικονομικά κέντρα της Ευρώπης. Είναι έδρα σημαντικών πολυεθνικών οργανισμών και διεθνών οργανισμών (όπως του NATO) και η οικονομία της εξειδικεύεται στον τριτογενή τομέα.

Το Κάιρο, πρωτεύουσα της Αιγύπτου, με πληθυσμό 6,7 εκατ. κατοίκους και έκταση 453 km<sup>2</sup> είναι η μεγαλύτερη πόλη της Αφρικής και από τις μεγαλύτερες και πιο πυκνοκα-

τοικημένες στον κόσμο. Το Κάιρο βρίσκεται εδώ και περισσότερα από χίλια χρόνια στις όχθες του Νείλου, κυρίως στην ανατολική όχθη, και κοντά στο Δέλτα του ποταμού. Το κλίμα του είναι θερμό τροπικό της ερήμου, με υψηλή υγρασία καθώς επηρεάζεται από την Μεσόγειο θάλασσα και τον Νείλο. Η βροχόπτωση είναι σπάνια και η χιονόπτωση εξαιρετικά σπάνια. Ο πληθυσμός του Καΐρου φτάνει σήμερα τα 20 εκατομμύρια (μητροπολιτικό Κάιρο και περιφέρεια της Γκίζας) και ως το 2030 αναμένεται να υπερβεί τα 25 εκατ. Η οικονομία του Καΐρου κατατάσσεται πρώτη στη Μέση Ανατολή και 43<sup>η</sup> παγκοσμίως. Επίσης, κατά την εκτίμηση του οίκου Moody's, αναμένεται οικονομική μεγέθυνση 58 % στα επόμενα χρόνια. Στον αστικό πυρήνα της πόλης παρατηρούνται τάσεις αποκέντρωσης προς περιφερειακούς πυρήνες και μείωση των ροών αγροτικών πληθυσμών. Αυτή η φυγόκεντρος τάση είχε σαν αποτέλεσμα την πληθυσμιακή ενίσχυση των προαστίων (Δυτική όχθη, Ντόκκι και Γκίζα) (Abdelhamid, 2004). Μεγάλο τμήμα του πληθυσμού του διαβιόει σε άτυπους και αυθαίρετους οικισμούς, επικρατούσα μορφή κατοίκησης στην πόλη, η οποία μαστιίζεται από έντονη λειψυδρία, ατμοσφαιρική ρύπανση, κυκλοφοριακό φόρτο και έντονες κοινωνικές ανισότητες. Η ραγδαία αστικοποίηση είχε σαν αποτέλεσμα την πολύ μεγάλη πληθυσμιακή πυκνότητα και την καταπάτηση πράσινων και καλλιεργήσιμων εκτάσεων από την δόμηση, κυρίως αυθαίρετη.

Το Λονδίνο με πληθυσμό 8,9 εκατ. κατ. και έκταση 1.579 km<sup>2</sup> είναι πρωτεύουσα και μεγαλύτερη πόλη του Ηνωμένου Βασιλείου. Είναι μια από τις πιο πυκνοκατοικημένες πόλεις της χώρας. Τοποθετείται στα νοτιοανατολικά της Αγγλίας, είναι χτισμένο στις όχθες του Τάμεση, με μέσο υψόμετρο 11 m και αποτελείται από 9 δήμους. Το μητροπολιτικό Λονδίνο έχει 32 διαμερίσματα και πληθυσμό 14 εκατ. κατ. και παράγει το 30 % του ΑΕΠ της Μεγάλης Βρετανίας. Το κλίμα του είναι εύκρατο ωκεάνιο με ψυχρούς χειμώνες αλλά συγκριτικά πιο θερμούς και υγρούς από τις γειτονικές χώρες γιατί επηρεάζεται από το θερμό θαλάσσιο ρεύμα του Κόλπου του Μεξικού (Gulf Stream). Τα καλοκαίρια είναι ήπια αλλά με τακτικές βροχοπτώσεις. Οι κλιματικές παραλλαγές στην μητροπολιτική επικράτεια οφείλονται στο φαινόμενο της αστικής θερμονησίδας κατά την οποία ο αέρας είναι πιο θερμός και ξηρός προς τον αστικό πυρήνα. Το Λονδίνο είναι μια παγκοσμιούπολη όπου φιλοξενεί πληθώρα επιχειρηματικών ομίλων, χρηματοοικονομικών ιδρυμάτων, επιχειρήσεων, ΜΜΕ και πολιτιστικών φορέων. Το λιμάνι του είναι ένα από τα μεγαλύτερα της χώρας. Παράλληλα, αποτελεί δημοφιλή τουριστικό προορισμό. Η πόλη σχετικά πρόσφατα (μεταπολεμικά), συγκριτικά με τις υπόλοιπες ευρωπαϊκές χώρες, εξειδικεύτηκε στον



τομέα των υπηρεσιών λόγω ιστορικών συνθηκών και συγκυριών. Το Λονδίνο περιβάλλεται από μία ζώνη βλάστησης ως αποτέλεσμα του πολεοδομικού σχεδιασμού και ελέγχου που ασκήθηκε στα μέσα της δεκαετίας του '50. Μεταπολεμικά ο πληθυσμός του σημείωσε μείωση, ιδιαίτερα στο κέντρο της πόλης, ως αποτέλεσμα εργασιακών και κοινωνικοοικονομικών συνθηκών. Η εσωτερική δομή της πόλης, με έντονη πολυεθνотική ετερογένεια, είναι σύνθετη και πολυκεντρική, με πολλαπλούς, διάσπαρτους πυρήνες χωρίς συγκεκριμένη ιεραρχία.

Το Μιλάνο είναι πρωτεύουσα της Λομβαρδίας στην Βόρεια Ιταλία και η δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Ιταλίας μετά την Ρώμη. Με πληθυσμό περίπου 3,2 εκατ. κατοίκους και μητροπολιτική περιοχή πάνω από 8 εκατ. αποτελεί ένα από τα πιο ισχυρά οικονομικά και εμπορικά κέντρα της Ευρώπης. Γεωγραφικά εντοπίζεται στο κέντρο της κοιλάδας του Πάδου σε υψόμετρο 120 m, βόρεια περικλείεται από τις υπώρειες των Άλπεων και στα νότια διατρέχεται από τον ποταμό Πάδο. Το κλίμα του είναι ηπειρωτικό με ψυχρούς και υγρούς χειμώνες και θερμά, υγρά καλοκαίρια. Το Μιλάνο άρχισε να γιγαντώνεται μεταπολεμικά όταν ροές μεταναστών από την νότια Ιταλία εγκαταστάθηκαν στον βιομηχανικό βορρά. Αυτό προκάλεσε την εξάπλωση του αστικού ιστού αλλά και την δημιουργία νέων αστικών πυρήνων μικρότερης δυναμικότητας. Αυτή η πληθυσμιακή και οικιστική πίεση συνεχίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του '70 με νέες ροές μεταναστών αυτή την φορά από το εξωτερικό (Μαρόκο, Αίγυπτο, Φιλιππίνες) και αργότερα, μετά το '90, από την Αλβανία. Το βασικά χαρακτηριστικά της πόλης του Μιλάνο είναι η παραγωγική και εμπορευματική του δυναμικότητα, η εξαγωγική του βάση και γεωγραφική του θέση επί των διαμετακομιστικών οδών. Μετά την απο-βιομηχανοποίηση της δεκαετίας του '70, το Μιλάνο αποτελεί επιτυχημένο παράδειγμα μετα-βιομηχανική πόλης αφού η δυναμική του μεταλλάσσεται προς τον τριτογενή τομέα με την ανάπτυξη του κλάδου των χρηματοοικονομικών υπηρεσιών, της μόδας και του σχεδιασμού.

Η Μόσχα είναι πρωτεύουσα της Ρωσίας, βρίσκεται στο δυτικό τμήμα της χώρας, στο κέντρο μιας τεράστιας πεδιάδας και χτισμένη στις όχθες του ποταμού Μόσχοβα, περίπου 480 km ανατολικά από τα σύνορα με την Λευκορωσία. Με έκταση 1.035 km<sup>2</sup> και πληθυσμό 12,5 εκατ. κατ. (μητροπολιτικό 20 εκατ.) η Μόσχα είναι το πολιτικό, βιομηχανικό και πνευματικό κέντρο της χώρας. Το κλίμα της επηρεάζεται από τους δυτικούς ανέμους που πνέουν από τον Ατλαντικό Ωκεανό και από ψυχρές και ξηρές αρκτικές αέριες μάζες που προκαλούν τακτικές χιονοπτώσεις καθ' όλη την διάρκεια του χειμώνα. Τα



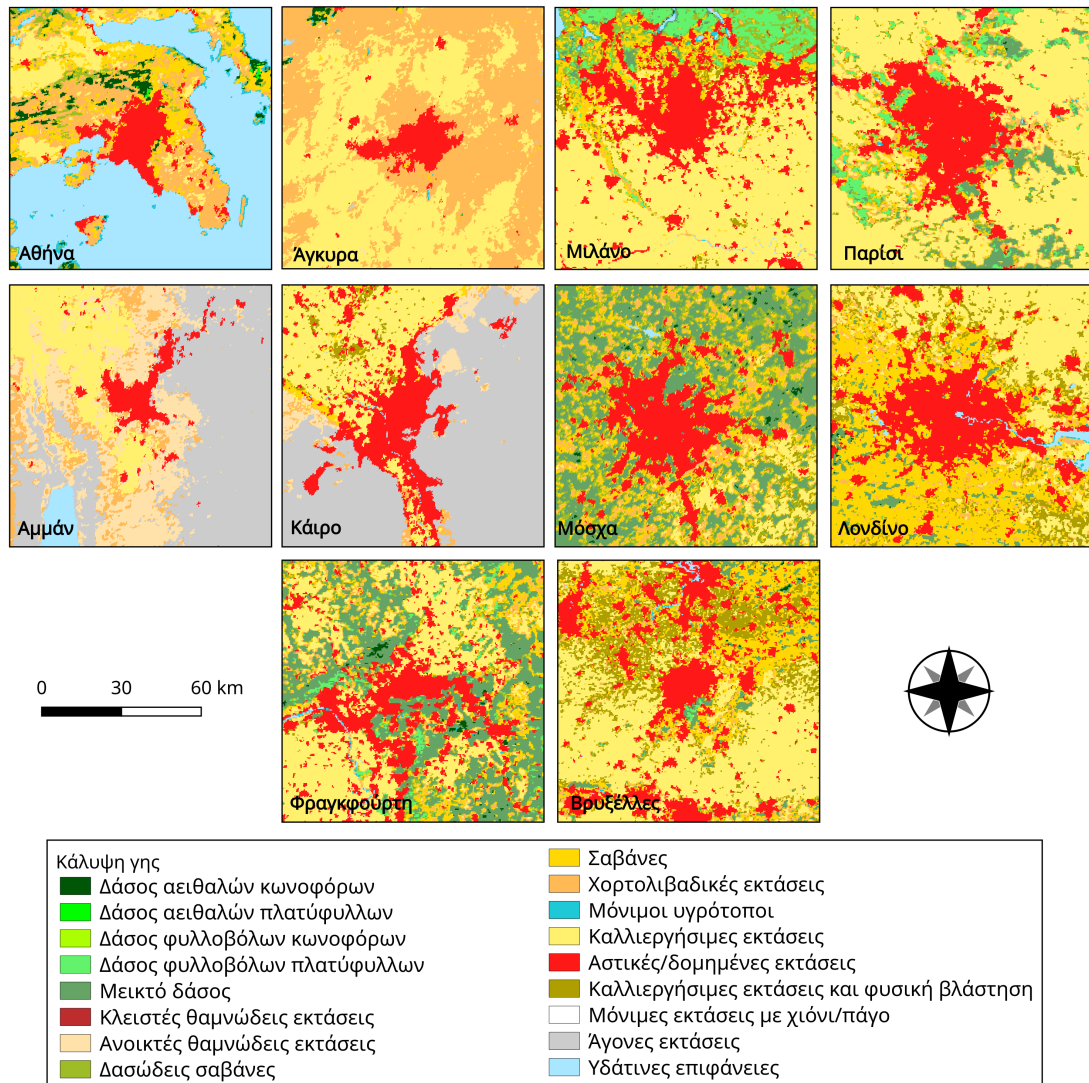
καλοκαίρια είναι σχετικά θερμά και η άνοιξη και το φθινόπωρο έχουν μικρή διάρκεια. Η πόλη αποτελούσε την πρωτεύουσα της πρώην Ένωσης Σοβιετικών Σοσιαλιστικών Δημοκρατιών (ΕΣΣΔ) και πολιτικό κέντρο του κομμουνιστικού καθεστώτος μέχρι το 1991, η διάλυση του οποίου επέφερε συνταρακτικές κοινωνικοοικονομικές αλλαγές και συγκεντρωση πλούτου στην πόλη. Η πόλη αναπτύσσεται σε ομόκεντρους κύκλους μαρτυρώντας την συνεχή διαχρονική της εξέλιξη από τον 15<sup>ο</sup> αιώνα. Στο κέντρο της πόλης είναι συγκεντρωμένες οι διοικητικές κρατικές υπηρεσίες, χώροι πολιτισμού, ξενοδοχεία και μεγάλα εμπορικά καταστήματα. Η πόλη κυριαρχεί οικονομικά σε σχέση με τις υπόλοιπες πόλεις και περιφέρειες της χώρας και αποτελεί παράδειγμα υπερ-συγκεντρωτισμού δεδομένου ότι σε αυτήν παράγεται το 21,7% του ΑΕΠ (Churkina και Zaverskiy, 2017). Αυτός ο διοικητικός, εμπορικός και χρηματοοικονομικός συγκεντρωτισμός οδήγησε σε περαιτέρω συγκέντρωση πληθυσμού στην πόλη με αποτέλεσμα την περίοδο 1989-2015 ο πληθυσμός της να σημειώσει αύξηση κατά 38,2%. Συνέπεια αυτής της εξέλιξης είναι η υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα που είναι κατά 1,6-3,3 φορές υψηλότερη από την Νέα Υόρκη, το Τόκιο, το Λονδίνο, το Βερολίνο και την Σανγκάη. Άλλα προβλήματα της πόλης είναι οι ανεπαρκείς μεταφορικές υποδομές, οι ελλειπείς κοινωνικές δομές, η ατμοσφαιρική ρύπανση και οι υποβαθμισμένες συνθήκες στέγασης για τον πληθυσμό.

Το Παρίσι πρωτεύουσα της Γαλλίας στα βόρεια της χώρας και στο κέντρο της περιφέρειας Ιλ-ντε-Φρανς (γαλλικά: Île-de-France) είναι χτισμένη σε λεκανοπέδιο στις όχθες του Σηκουάνα. Το κλίμα του είναι εύκρατο μεσογειακό (ήπιους χειμώνες, θερμά ξηρά καλοκαίρια) και επηρεάζεται, όπως και του Λονδίνου, από το ρεύμα του Κόλπου του Μεξικού. Είναι από τις μεγαλύτερες πόλεις πανευρωπαϊκά (μαζί με το Λονδίνο) αλλά και παγκοσμίως, με πληθυσμό 2,2 εκατ. κατ. και σχεδόν 12 εκατ. κατ. στην μητροπολιτική περιοχή (έκταση 12.012 km<sup>2</sup>). Διαχρονικά ο πληθυσμός της σημείωσε αρκετές διακυμάνσεις (και μείωση) λόγω οικονομικών και κοινωνικών συνθηκών (έλλειψη κατοικιών, προαστιοποίηση, αποβιομηχανοποίηση, gentrification (εξευγενισμός), αλλαγές χρήσεων γης). Είναι από τις πιο πυκνοκατοικημένες πόλεις παγκοσμίως, με πυκνοδομημένη επιφάνεια και περιορισμένους ελεύθερους χώρους. Αποτελεί το οικονομικό, επιχειρηματικό και πολιτιστικό κέντρο της Γαλλίας.

Η Φραγκφούρτη είναι πόλη της δυτικής Γερμανίας στα κεντρικά της χώρας στις όχθες του ποταμού Μάιν (γι' αυτό και η επίσημη ονομασία είναι Φραγκφούρτη επί του Μάιν), 30 km από την συμβολή του με τον Ρήνο ποταμό. Η πόλη αριθμεί περίπου 2,3 εκατ. κα-

τοίκους αλλά η ευρύτερη μητροπολιτική περιοχή (Ρήνου-Μάιν) έχει πληθυσμό 5 εκατ. κατοίκους. Κλιματολογικά η πόλη εντάσσεται στο εύκρατο ωκεάνιο κλίμα και λόγω της γεωγραφικής της θέσης, στα άκρα της κοιλάδας του Ρήνου, είναι μια από τις θερμότερες και πιο ξηρές περιοχές της Γερμανίας. Η περιοχή του Ρήνου-Μάιν είναι ένα πολυκεντρικό αστικό σύστημα και λειτουργεί ως παγκόσμιο κέντρο εμπορίου και υπηρεσιών με διεθνές αεροδρόμιο, βιομηχανίες, ακαδημαϊκά ιδρύματα, ερευνητικά κέντρα και επιχειρήσεις έρευνας και τεχνολογίας. Η επιρροή του στον χώρο είναι αποτέλεσμα μιας σύνθετης σχέσης με ένα ευρύτερο οικιστικό δίκτυο μικρότερων πόλων όπως το Wiesbaden, το Mainz, το Darmstadt, το Offenbach, το Hanau και το Aschaffenburg (Peterek και Bürklin, 2014). Η μετάβαση της πόλης από την βιομηχανική δραστηριότητα σε ένα νέο οικονομικό μοντέλο βασισμένο στις υπηρεσίες είχε σαν αποτέλεσμα την επαναστικοποίηση της με όρους θέσεων εργασίας και πληθυσμού. Πλέον η Φραγκφούρτη λειτουργεί σαν ένα παγκόσμιο εμπορικό κέντρο και πύλη εισόδου.

Στον Χάρτη 6 αποτυπώνεται η κάλυψη γης στις περιοχές μελέτης και τον περιαστικό χώρο αυτών με βάση το πρότυπο International Geosphere–Biosphere Programme (IGBP). Το πρότυπο για την κάλυψη γης έγινε σε στενή συνεργασία με κορυφαίους οργανισμούς (United States Geological Survey, NASA, National Oceanic and Atmospheric Administration, European Space Agency) με στόχο να αναπτυχθεί ένα σχήμα ταξινόμησης παγκόσμιας εμβέλειας με 17 κλάσεις και με χωρική ανάλυση 1 km (Seitzinger et al., 2015). Στα δεδομένα MODIS Terra and Aqua reflectance data (προϊόν MCD12Q1) χρησιμοποιείται αυτό το σχήμα ταξινόμησης και διανέμονται αντίστοιχα δεδομένα σε ετήσια συχνότητα και με καλύτερη χωρική ευκρίνεια (500 m). Όπως φαίνεται από τον χάρτη, οι περιοχές μελέτης διαφέρουν αρκετά ως προς την μίξη και την αναλογία των επιμέρους καλύψεων γης γεγονός που μαρτυρά το διαφορετικό βαθμό αστικοποίησης, το παραγωγικό τους μοντέλο, την οικολογική/περιβαλλοντική τους ιδιομορφία και τις ιδιότητες του κλίματος και του εδάφους τους. Οι παραπάνω παράγοντες είναι καθοριστικοί κατά την διαδικασία διόρθωσης των δεδομένων DMSP/OLS και την προτεινόμενη μεθοδολογία.

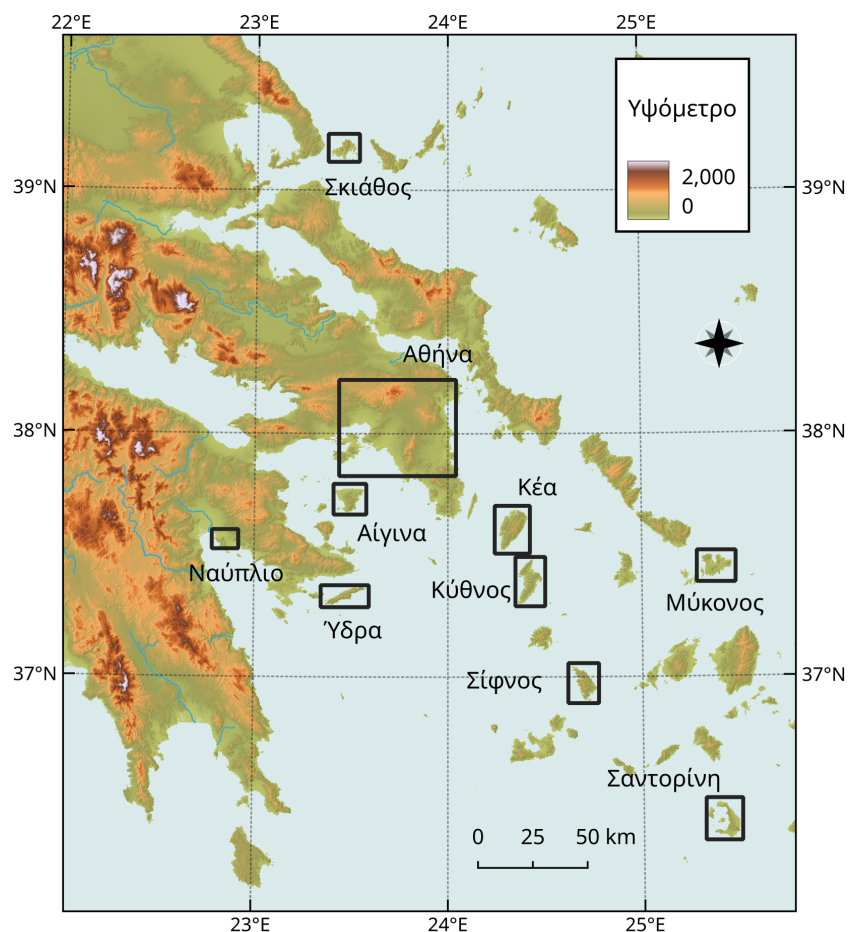


Χάρτης 6: Κάλυψη γης με βάση την κατηγοριοποίηση: MCD12Q1 - International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP). (Πηγή: MODIS/Terra & Aqua Land Cover Type 2019, ιδία επεξεργασία).

Κατά την επεξεργασία και βελτίωση των δεδομένων snpp-VIIRS οι περιοχές μελέτης είναι επιλεγμένες περιοχές του ελλαδικού χώρου: η Αθήνα, η Σκιάθος, η Μύκονος, η Αίγινα, το Ναύπλιο, η Ύδρα, η Κέα, η Σίφνος και η Σαντορίνη (βλ. Χάρτη 7). Η μέθοδος Dark Object Subtraction δοκιμάζεται στην Αττική και ως περιοχή Dark Object ορίζεται η νήσος Κύθνος. Στον Χάρτη 7, εντοπίζονται οι συγκεκριμένες περιοχές στον Ελλαδικό χώρο και στον Πίνακα 8 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

Περιοχή	Πληθυσμός	Μέσο υψόμετρο (m)
Αθήνα	3.761.810	280
Αίγινα	13.552	124
Κέα	2.417	209
Κύθνος	1.310	122
Μύκονος	10.134	91
Ναύπλιο	14.203	91
Σαντορίνη	15.250	108
Σίφνος	2.625	195
Σκιάθος	6.610	115
Ύδρα	1.966	188

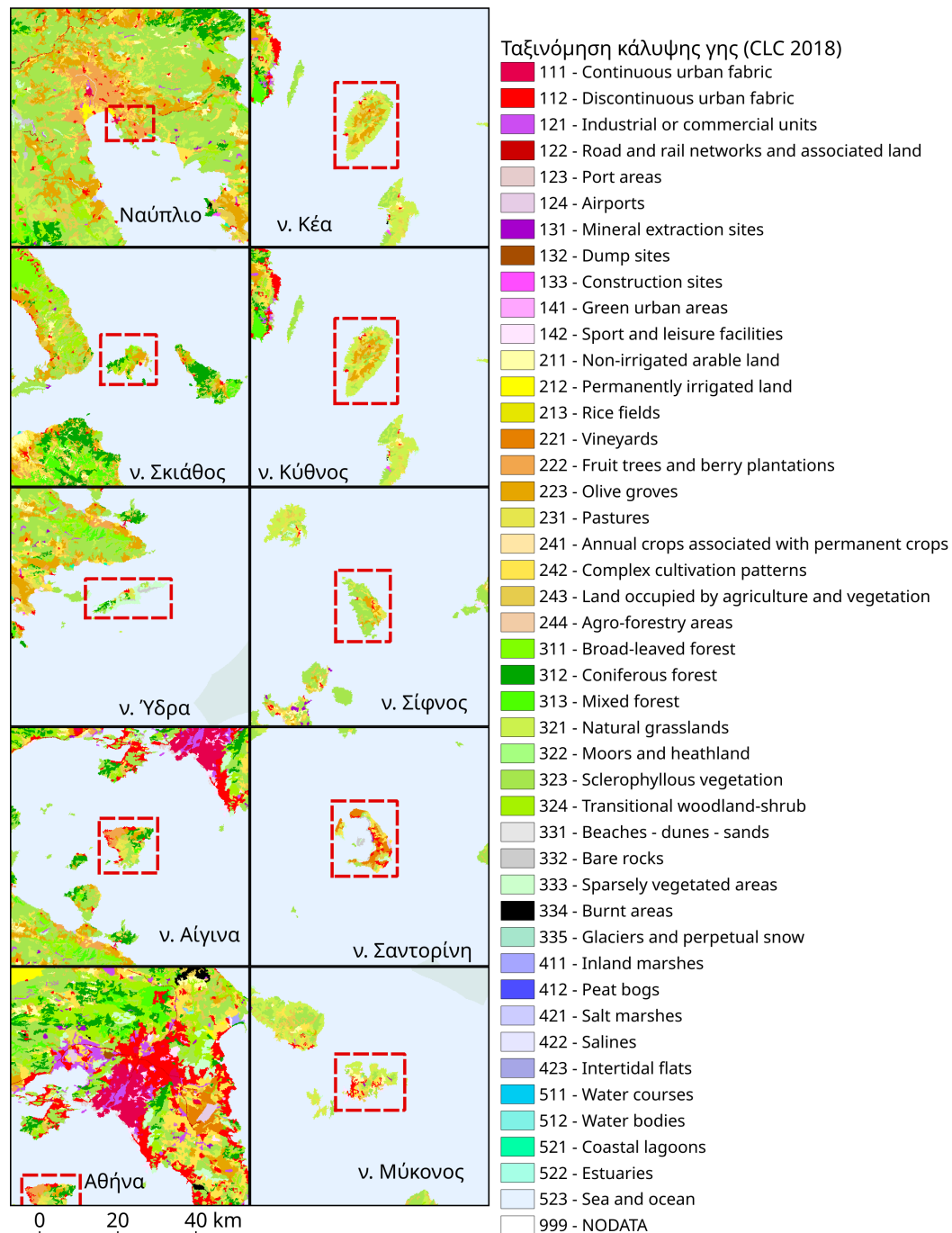
Πίνακας 8: Περιοχές μελέτης στον Ελλαδικό χώρο. (Πηγή: Ελληνική Στατιστική Αρχή, SRTM DEM, ίδια επεξεργασία).



Χάρτης 7: Περιοχές μελέτης για την εφαρμογή της μεθόδου Median Shift και η περιοχή Dark Object. (Πηγή: SRTM DEM, ίδια επεξεργασία).

Στον Χάρτη 8 αποτυπώνεται η κάλυψη γης των εν λόγω περιοχών με βάση τα δε-

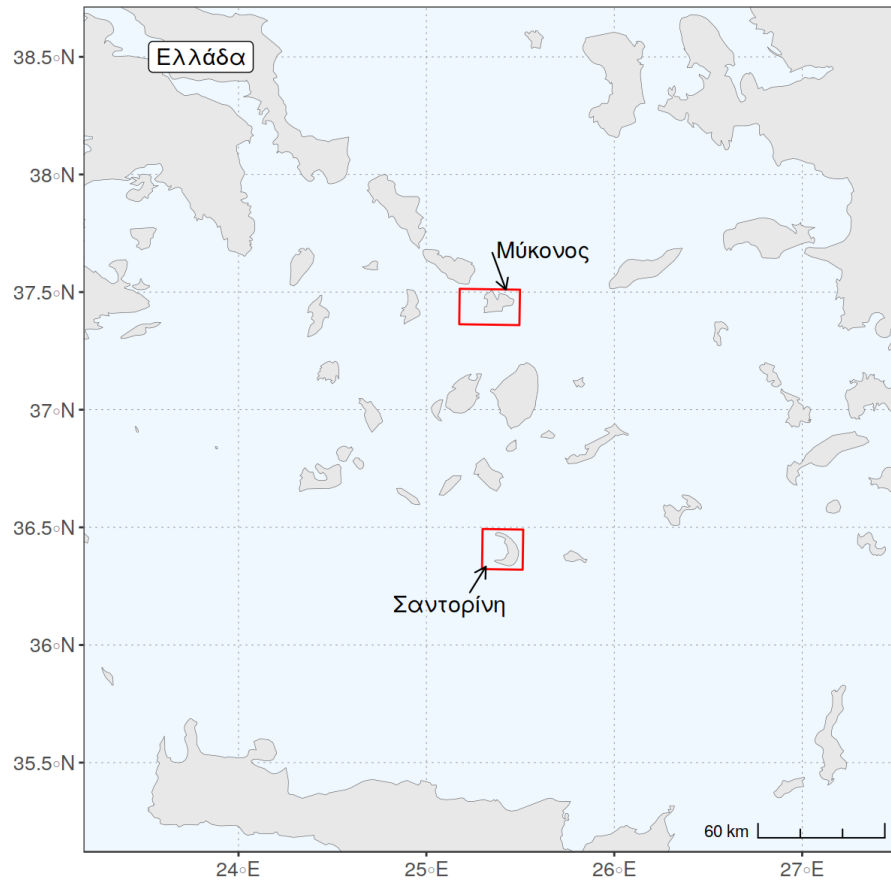
δομένα Corine Land Cover (2018). Όπως προκύπτει από τον Χάρτη 8, οι περιοχές αυτές έχουν διαφορετικό βαθμό αστικοποίησης, με διαφορετικές αναλογίες καλλιεργήσιμης γης, αστικής γης και δασικών εκτάσεων.



Χάρτης 8: Κάλυψη γης κατά Corine Land Cover 2018 για τις περιοχές μελέτης στον Ελλαδικό χώρο. (Πηγή: Corine Land Cover 2018, ίδια επεξεργασία).

Για την εφαρμογή των νυχτερινών φωτών στο φαινόμενο της φωτορύπανσης, ο προτεινόμενος δείκτης (Stathakis et al., 2018) δοκιμάστηκε σε δύο ελληνικά νησιά με έντονη τουριστική κίνηση και ετήσια διακύμανση της οικονομικής και πληθυσμιακής τους δυνα-

μικής (Stathakis και Baltas, 2018), την Μύκονο και την Σαντορίνη (βλ. Χάρτης 9).



Χάρτης 9: Μελέτη περιπτώσεων εφαρμογής της μεθόδου φωτορύπανσης, Μύκονος και Σαντορίνη

Παρακάτω παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά της κάθε περιοχής μελέτης στον Ελλαδικό χώρο.

Η Μύκονος (10.134 κατ.), με πρωτεύουσα την Χώρα, είναι νησί των Ανατολικών Κυκλάδων στο Αιγαίο Πέλαγος. Υπάγεται στον δήμο Μυκόνου σύμφωνα με το σχέδιο «Καλλικράτης» και έχει έκταση 106 km<sup>2</sup>. Νησί πετρώδες και άνυδρο με περιορισμένη καλλιεργήσιμη γη είναι γνωστή για τον αιγαιοπελαγίτικο χαρακτήρα της, την αρχιτεκτονική της και το φυσικό της τοπίο. Η Μύκονος είναι χαρακτηριστική για τον κοσμοπολίτικο χαρακτήρα της, τον τουρισμό υψηλού επιπέδου και τις άρτιες τουριστικές υποδομές. Ο τουρισμός στο νησί άρχισε να αναπτύσσεται ήδη από την δεκαετία του '60 με την κατασκευή των πρώτων ξενοδοχείων και πλέον έχει γίνει πόλος έλξης για την ελίτ και τον μαζικό τουρισμό. Το μέγιστο της τουριστικής κίνησης παρατηρείται κατά τους θερινούς μήνες. Η ραγδαία τουριστική ανάπτυξη στο νησί επέφερε, πέρα από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλοίωση του τοπικού παραδοσιακού χαρακτήρα, αλλοίωση της ταυτότητας και ιδιοσυγκρασίας του τοπικού πληθυσμού, άναρχη δόμηση και εξάντληση της φέρουσας

ικανότητας του νησιού.

Η Σαντορίνη (ή Θήρα) είναι νησί των Κυκλάδων, νότια της Ίου και δυτικά της Ανάφης και διοικητικά υπάγεται στον δήμο Θήρας. Έχει έκταση 76 km<sup>2</sup> και πληθυσμό 15.250 κατοίκους. Πρωτεύουσα της είναι η Φηρά. Η Σαντορίνη ανήκει στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου και το ηφαίστειο της είναι ενεργό. Το ηφαιστειακό τοπίο αποτελεί τον σημαντικότερο τουριστικό πόρο του νησιού. Το νησί κατατάσσεται στους κορυφαίους τουριστικούς προορισμούς παγκοσμίως λόγω του εξαιρετικού φυσικού τοπίου. Όπως και η Μύκονος, είναι άνυδρη αλλά το έδαφός της είναι πεδινό, ηφαιστειογενές, και γόνιμο στο μεγαλύτερο μέρος του εκτός από το βραχώδες τμήμα του κοντά στο ηφαίστειο. Η Μύκονος και η Σαντορίνη αποτελούν τα βασικά σημεία εισόδου των τουριστών στα νησιά των Κυκλάδων. Και τα δύο νησιά δέχονται ισχυρή παράκτια πίεση (Prokopiou et al., 2018).

Η Κέα (ή Τζιά) είναι το πλησιέστερο νησί των Κυκλάδων στην ηπειρωτική Ελλάδα με πληθυσμό 2.455 κατοίκους και έκταση 132 km<sup>2</sup> (από τα μεγαλύτερα νησιά των Κυκλάδων). Μαζί με την Μακρόνησο αποτελούν τον δήμο Κέας, με πρωτεύουσα την Ιουλίδα (ή Χώρα) και κυριότερο λιμάνι την Κορησσία (ή Λιβάδι). Εξαιτίας του μικρού χρόνου μετάβασης (περίπου 2 ώρες) από την Αττική (απέχει μόλις 16 μίλια από το Λαύριο) στο νησί, αυτό αποτελεί πλέον άμεσο τουριστικό προορισμό για τον πληθυσμό της Αθήνας (γνωστό ως «το νησί του Σαββατοκύριακου»). Λιγότερο δημοφιλής και αραιοκατοικημένη, με έντονο ορεινό ανάγλυφο (μέσο υψόμετρο 209 m), η Κέα έχει προσελκύσει το υπέρμετρο επενδυτικό ενδιαφέρον των Αθηναίων για την κατασκευή παραθεριστικών κατοικιών.

Η Αίγινα είναι νησί στο κέντρο του Αργοσαρωνικού και το δεύτερο σε έκταση νησί μετά την Σαλαμίνα. Έχει έκταση 85 km<sup>2</sup> και πληθυσμό 12.930 κατ. Με μέγιστο υψόμετρο 523 m και μέσο 124 m το ανάγλυφό της αποτελείται από χαμηλούς λόφους. Στα κεντρικά, νότια και ανατολικά το νησί είναι ημιορεινό ενώ στα δυτικά και βορειοδυτικά το ανάγλυφο είναι επίπεδο με περισσότερες κατοικημένες περιοχές. Το νησί είναι άνυδρο και υδρεύεται με μεταφορά υδάτων. Το κλίμα του νησιού είναι μεσογειακό και σε συνδυασμό με τα ιαματικά λουτρά αποτελούν ιδανικό τουριστικό προορισμό για ανάρρωση. Η Αίγινα είναι ανεπτυγμένη τουριστικά, λόγω της εγγύτητας με την Αττική, της ύπαρξης αξιόλογων αρχαιολογικών πόρων (Αφαία, βυζαντινά μνημεία) και του θρησκευτικού τουρισμού λόγω του Αγίου Νεκταρίου. Η Αίγινα είναι επίσης γνωστή για την παραγωγή του φιστικιού, προϊόν Προστατευόμενης Ονομασίας Προέλευσης (ΠΟΠ), η καλλιέργεια του οποίου κυριαρχεί στο νησί έναντι των άλλων.



Η Κύθνος ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα των δυτικών Κυκλάδων του Αιγαίου Πελάγους, βρίσκεται ανάμεσα στην Κέα και στην Σέριφο και απέχει 56 μίλια από τον Πειραιά. Έχει πληθυσμό 1.310 κατ. και έκταση 99 km<sup>2</sup>. Είναι ημιορεινό νησί (μέγιστο υψόμετρο 336 m) με έντονο ανάγλυφο. Οι κυριότεροι οικισμοί στο νησί είναι η Χώρα (ή Μεσαριά) και η Δρυοπίδα. Πρόκειται για γραφικό νησί το οποίο δεν έχει επηρεαστεί από τα κύματα του μαζικού τουρισμού και επομένως διατηρεί την τοπική παραδοσιακή αρχιτεκτονική και το κυκλαδίτικο τοπίο. Στο νησί δημιουργήθηκε το 1982 ένα από τα πρώτα αιολικά πάρκα στην Ευρώπη και στην συνέχεια το πρώτο φωτοβολταϊκό πάρκο στην Ελλάδα.

Το Ναύπλιο (14.203 κατ.) είναι παραδοσιακός, παραθαλάσσιος οικισμός της Πελοποννήσου, πρωτεύουσα της ΠΕ Αργολίδας και έδρα του δήμου Ναυπλιέων. Είναι το κυριότερο λιμάνι της ανατολικής Πελοποννήσου και συγκεντρώνει πλήθος εμπορικών, οικονομικών δραστηριοτήτων και δημοσίων υπηρεσιών. Εξαιτίας της εγγύτητας με την Αττική, του παραδοσιακού του τοπίου και της πληθώρας των ιστορικών μνημείων αποτελεί δημοφιλή τουριστικό προορισμό.

Η Σίφνος είναι νησί των δυτικών Κυκλάδων και απέχει από τον Πειραιά 80 μίλια. Έχει έκταση 74 km<sup>2</sup> και πληθυσμό 2.625 κατ. Πρωτεύουσα του νησιού είναι η Απολλωνία και διοικητικά υπάγεται στην ΠΕ Μήλου. Είναι ορεινό νησί (μέγιστο υψόμετρο 680 m, Προφήτης Ηλίας), με περιορισμένη βλάστηση αλλά με μικρές και εύφορες κοιλάδες. Εκτός από το γραφικό κυκλαδίτικο τοπίο η Σίφνος είναι γνωστή για την λαϊκή της παράδοση (αγγειοπλαστική τέχνη), την γαστρονομία της, την μεσαιωνική της αρχιτεκτονική (παραδοσιακός οικισμός του Κάστρου) και τις ποικίλες πολιτιστικές εκδηλώσεις.

Η Ύδρα (πληθυσμός 1.966 κατ.), πόλη και κοσμοπολίτικο νησί του Αργοσαρωνικού έχει έκταση 64,4 km<sup>2</sup>. Γεωγραφικά εντοπίζεται στο Μυρτώο πέλαγος απέναντι από την ακτή της Ερμιονίδας στη νοτιοανατολική ακτή της Πελοποννήσου. Είναι άγονο, άνυδρο και ημιορεινό νησί (μέγιστο υψόμετρο 592 m, Έρως), με έδαφος τραχύ. Γι' αυτόν τον λόγο η κύρια απασχόληση των κατοίκων της είναι η ναυτιλία, η αλιεία και ο τουρισμός. Είναι αξιόλογος τουριστικός προορισμός λόγω της γειννίας με την νοτιοανατολική ακτή της Αργολίδας και τον Πειραιά. Η Ύδρα έχει μεγάλη ναυτική παράδοση, ανέδειξε ισχυρές προσωπικότητες κατά την Ελληνική Επανάσταση και γνώρισε μεγάλη ακμή κατά το τέλος του 18<sup>ου</sup> και τις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα.

Η Σκιάθος είναι νησί των Σποράδων στο βορειοδυτικό Αιγαίο πέλαγος. Είναι το δυ-

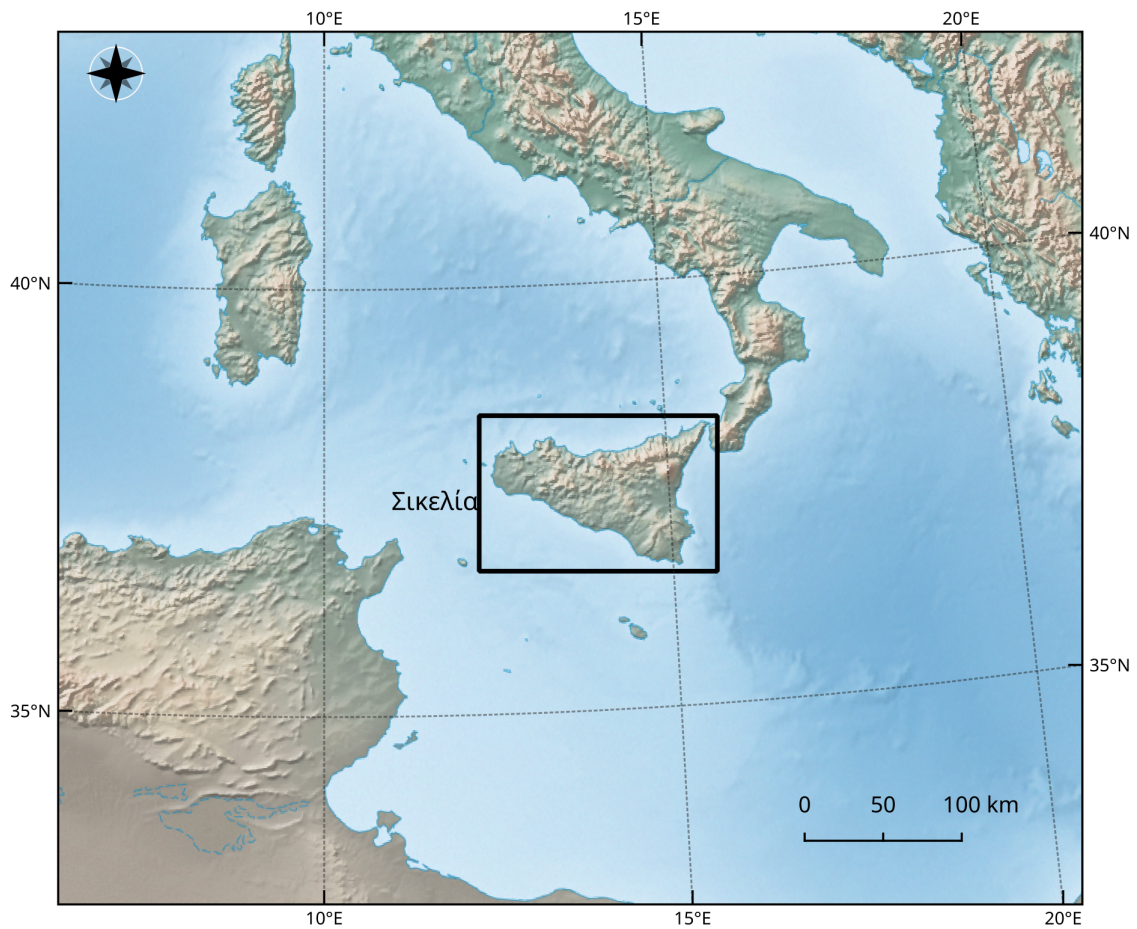


τικότερο νησί του συμπλέγματος και το εγγύτερο στην ηπειρωτική Ελλάδα, βρίσκεται ανατολικά του Πηλίου και δυτικά της Σκοπέλου. Έχει πληθυσμό 6.610 κατ. και έκταση 48 km<sup>2</sup>. Ο δήμος Σκιάθου ανήκει στην Περιφέρεια Θεσσαλίας (Σχέδιο «Καλλικράτης») με έδρα τη Σκιάθο. Περιλαμβάνει τη Σκιάθο και περιφερειακές νησίδες. Το ανάγλυφό της ποικίλει, έτσι στο νότιο τμήμα οι κλίσεις είναι πιο ήπιες και εκεί εντοπίζονται οι περισσότεροι οικισμοί ενώ το βόρειο τμήμα είναι πιο ορεινό με ψηλότερη κορυφή το Καραφιλτζανάκα (433 m). Ο σημαντικότερος οικισμός είναι η Σκιάθος στα ανατολικά του νησιού. Εξαιτίας του ιδιαίτερου φυσικού κάλλους που προσδίδουν οι παραλίες και τα πευκοδάση της, η Σκιάθος αποτελεί ιδιαίτερο τουριστικό προορισμό.

Κατά την πρόβλεψη της αστικοποίησης με βάση τα νυχτερινά φώτα, οι περιοχές μελέτης είναι ο ελλαδικός χώρος. Επίσης για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας χρησιμοποιείται η Αθήνα και το Μιλάνο. Για την πρόβλεψη της χρονοσειράς DMSP/OLS και κατά την διαδικασία διαβαθμονόμησης ορίστηκε περιοχή αναφοράς η Σικελία (βλ. Χάρτης 10) λόγω της διαχρονικής σταθερότητας που παρουσιάζει στην μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας των νυχτερινών φώτων.

Η Σικελία, με πρωτεύουσα το Παλέρμο (1,2 εκατ. κατ.) και πληθυσμό 5 εκατ. κατοίκους, είναι νησί της Ιταλίας και ένα από τα μεγαλύτερα σε έκταση και πληθυσμό νησιά της μεσογείου. Άλλες μεγάλες πόλεις του νησιού είναι η Κατάνια (1,1 εκατ. κατ.) και η Μεσσήνη (0,65 εκατ. κατ.). Γεωγραφικά εντοπίζεται 160 km ΒΑ της Τυνησίας και βρίσκεται στα νότια της ιταλικής χερσονήσου. Αποτελεί τμήμα του Μετσοτζόρνο ("Mezzogiorno"), μιας λιγότερο βιομηχανοποιημένης και ανεπτυγμένης περιοχής της Ιταλίας. Η Σικελία κλιματολογικά εντάσσεται στην μεσογειακή κλιματική ζώνη με ξηρά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες αλλά με έντονες τοπικές κλιματολογικές ιδιαιτερότητες λόγω του έντονου αναγλύφου. Χαρακτηριστικό γεωλογικό φαινόμενο στο νησί είναι το ηφαίστειο Αίτνα (3.326 m), το μεγαλύτερο στην Ευρώπη και ένα από τα πιο ενεργά ηφαίστεια παγκοσμίως. Μεταπολεμικά παρατηρούνται δύο τάσεις στην αστικοποίηση του νησιού. Αφενός η έντονη συρροή του πληθυσμού της υπαίθρου προς τα μεγάλα αστικά κέντρα (Κατάνια, Συρακούσες, Παλέρμο, Αγκριγκέντο, Μεσσήνη) και αφετέρου η πληθυσμιακή κίνηση από την ενδοχώρα του νησιού προς τα παράλια. Από τα μέσα της δεκαετίας του '70 ξεκινά μια περίοδος απο-αστικοποίησης, κυρίως του αστικού πυρήνα, των μεγάλων αστικών κέντρων της Σικελίας και μια αυξητική τάση του πληθυσμού μικρότερων περιφερειακών αστικών κέντρων (D'Urso, 2011). Η Σικελία, με υψηλά ποσοστά ανερ-

γίας, παραμένει ακόμα μια αγροτική οικονομία παρ' όλη την τουριστική και βιομηχανική ανάπτυξη των τελευταίων ετών.



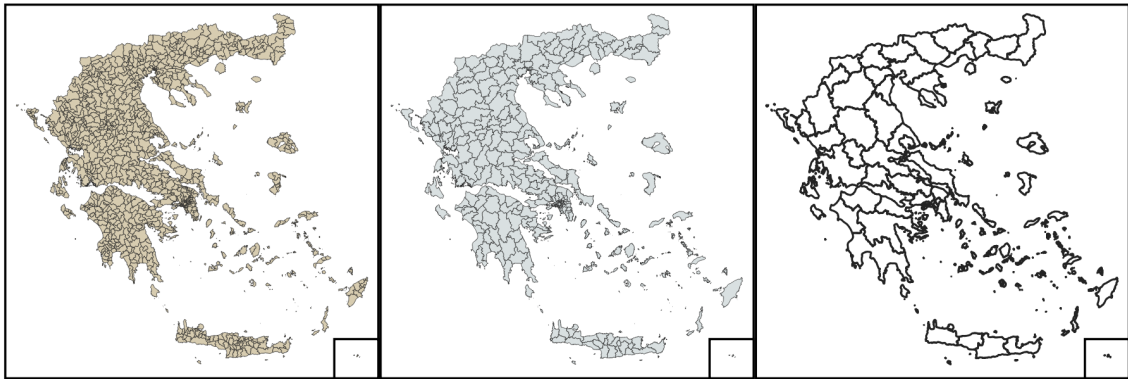
Χάρτης 10: Η Σικελία (Πηγή δεδομένων: *Natural Earth-Free Vector and Raster Map Data at 1:10m, 1:50m, and 1:110m Scales 2009–2021*, ιδία επεξεργασία).

Στην έρευνα για την εποχικότητα, περιοχή μελέτης είναι ο Ελλαδικός χώρος. Η ανάλυση της εποχικότητας θα εφαρμόστηκε σε δύο διαφορετικές χωρικές/διοικητικές μονάδες αναφοράς, τους Καποδιστριακούς (1035 διοικητικές ενότητες) και τους Καλλικρατικούς δήμους (326 διοικητικές ενότητες) της Ελλάδας (βλ. Χάρτη 11). Επιλέχθηκε η ταυτόχρονη εφαρμογή και στις δύο κλίμακες γιατί αφενός η Καποδιστριακή διοικητική διάρθρωση προσφέρει μεγαλύτερη χωρική ανάλυση και αφετέρου ως μέτρο σύγκρισης για να εξασφαλιστεί ότι το αποτέλεσμα δεν επηρεάζεται δραστικά από το Πρόβλημα Τροποποιούμενης Επιφανειακής Μονάδας (Modifiable Areal Unit Problem (MAUP)).

Ο όρος MAUP διατυπώθηκε πρώτη φορά από τους Openshaw και Taylor (1979) οι οποίοι αποτίμησαν την επίδραση της διαφοροποίησης της οριοθέτησης του χώρου ή της επανασύστασης του σε νέες διακριτές χωρικές ενότητες στα εξαγόμενα δεδομένα και αποτελέσματα. Η πρώτη περίπτωση αφορά το «πρόβλημα των ζωνών», όπου δεν αλλάζει ο

αριθμός των ζωνών κατάτμησης του χώρου αλλά τα μεταξύ τους όρια, το σχήμα και η θέση τους. Η δεύτερη ιδιότητα είναι το «πρόβλημα της κλίμακας» το οποίο προκύπτει μέσω της συνάθροισης (ή από-συνάθροισης) χωρικών μονάδων ή αλλάζοντας την διακριτική ικανότητα (resolution) των δεδομένων. Και οι δύο περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε ασυνέπεια στα αποτελέσματα της έρευνας.

Η εκτίμηση του ΑΕΠ σε μηνιαία βάση, έγινε για όλες τις στατιστικές μονάδες NUTS 3 της Ελλάδας (52 χωρικές μονάδες) για την περίοδο Ιανουάριος 2014 - Δεκέμβριος 2017 (βλ. Χάρτης 11). Η ανάλυση για τις επιπτώσεις του γενικού απαγορευτικού που επιβλήθηκαν λόγω της COVID-19 έγινε στην Ελλάδα σε επίπεδο Καλλικρατικού δήμου. Τέλος, η ανάλυση των προτύπων μετακίνησης δοκιμάστηκε στους Καλλικρατικούς δήμους της Αττικής.



Χάρτης 11: Οι Καποδιστριακοί (αριστερά) και Καλλικρατικοί (κέντρο) δήμοι. Οι στατιστικές χωρικές μονάδες NUTS 3 (δεξιά). (Πηγή: OKXE, Eurostat, ίδια επεξεργασία).

### 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία της έρευνας στηρίζεται στην μελέτη της κύριας βιβλιογραφίας και των επιστημονικών άρθρων που αφορούν τα νυχτερινά φώτα ώστε να αποκτηθεί η απαραίτητη γνώση μέσω της επιστημονικής τους χρήσης ως εργαλείο για την παρακολούθηση και κατανόηση του αστικού χώρου. Εφαρμόζονται στατιστικές μέθοδοι και χρησιμοποιούνται Σ.Γ.Π. για την επεξεργασία των δεδομένων και την διεξαγωγή συμπερασμάτων. Για την εκπόνηση των πειραμάτων, την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων, την κοινοποίηση των αποτελεσμάτων προς το κοινό χρησιμοποιείται Ελεύθερο Λογισμικό/Λογισμικό Ανοικτού Κώδικα (ΕΛ/ΛΑΚ), ανοικτά αποθετήρια για την ανάρτηση του κώδικα και ελεύθερες πλατφόρμες για την διάθεση των προϊόντων. Στις επόμενες ενότητες γίνεται αναλυτική αναφορά στην μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την διεξαγωγή της έρευνας. Η μεθοδολογία επικεντρώνεται στην προεπεξεργασία των δεδομένων νυχτερινών φώτων και στην χρήση τους στα αστικά φαινόμενα.

### 3.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ DMSP/OLS

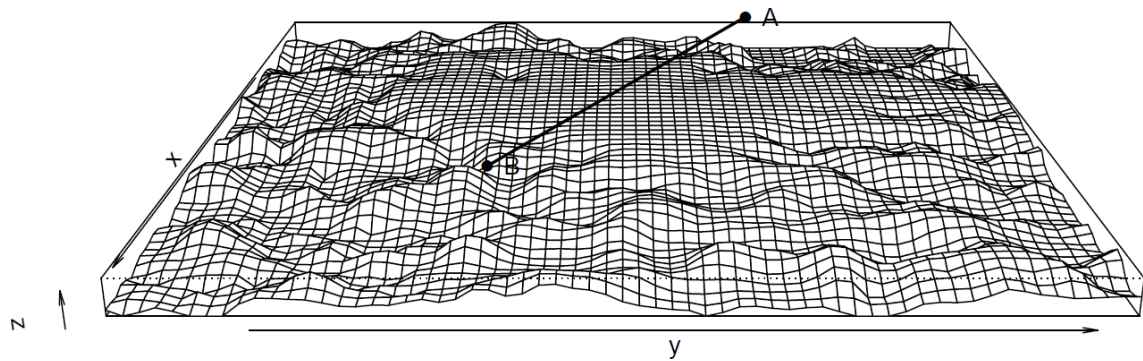
Τα δεδομένα νυχτερινών φώτων DMSP/OLS έχουν ευρεία συνεισφορά στην μελέτη των χωρικών αστικών φαινομένων και τις διαδικασίες της αστικοποίησης. Ενδεικτικά οι έρευνες με τα δεδομένα DMSP/OLS επικεντρώνονται στην μελέτη της αστικής έκτασης και εξάπλωσης (Imhoff et al., 1997b· Jing et al., 2015· Liu et al., 2012· Stathakis et al., 2015· Sutton, 2003· Zhang και Seto, 2011), την εκτίμηση του πληθυσμού (Amaral et al., 2006· Amaral et al., 2005· Sutton et al., 2001) και την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας (Amaral et al., 2005· Chand et al., 2009), στην εκτίμηση της φωτεινότητας του νυχτερινού ουρανού και της φωτορύπανσης (Cinzano και Elvidge, 2004· Cinzano et al., 2001· Stathakis et al., 2018).

Παρόλη την αδιαμφισβήτητη αξία των δεδομένων DMSP/OLS Stable Lights στην μελέτη των αστικών χωρικών διαδικασιών και των συγκριτικών τους πλεονεκτημάτων (επαρκή χρονοσειρά, επιπλέον προεπεξεργασία για την εξάλειψη των νεφών, αφαίρεση αδέσποτου ηλιακού φωτός) αυτά πάσχουν από μια σειρά αστοχιών.

Μία από τις βασικότερες αδυναμίες των δεδομένων (βλ. λεπτομέρειες στην ενότητα 2.1.2) σε σχέση με την αναλυτική τους επάρκεια ως προς το αστικό τοπίο είναι ο «κορεσμός» (saturation) της καταγραφής των υψηλών τιμών ακτινοβολίας λόγω του περιορισμένου ραδιομετρικού εύρους καταγραφής του αισθητήρα (βλ. τρισδιάστατη απόδοση του προβλήματος στην Εικόνα 9). Άμεσος αντίκτυπος είναι η αδυναμία να καταγράφει υψηλές τιμές ακτινοβολίας ( $DN > 63$ ) στον αστικό πυρήνα και κατά συνέπεια να αποδώσει με ακρίβεια την ποικιλομορφία στις αστικές λειτουργίες όπως αυτές αποτυπώνονται μέσα από τα νυχτερινά φώτα.

Ο αισθητήρας DMSP/OLS λειτουργεί σε συνθήκη υψηλής ευαισθησίας (high gain) ενισχύοντας το εισερχόμενο σήμα δεδομένου ότι η κατασκευή του προορίζονταν για τον εντοπισμό νεφών την νύχτα. Ο συνδυασμός χαμηλής ραδιομετρικής ανάλυσης (6 bit) και η ενίσχυση του εισερχόμενου σήματος οδηγεί σε κορεσμό (saturation) στις πολύ φωτεινές αστικές περιοχές και απώλεια της απόδοσης της παραλλαγής του αστικού τοπίου. Παράλληλα με τον κορεσμό, παρατηρείται και το φαινόμενο της υπερ-λάμψης (overglow), κατά το οποίο ο αισθητήρας καταγράφει τιμές φωτός σε περιοχές που δεν υπάρχουν σχετικές πηγές (π.χ. στα όρια του αστικού ιστού ή στην θαλάσσια περιοχή πλησίον της ακτογραμμής) (Zhang et al., 2013). Κατά την υπερ-λάμψη, οι καταγραφόμενες φωτεινές εκτάσεις αποδίδονται μεγαλύτερες από τις πραγματικές εξαιτίας της διάχυσης του φωτός στην

ατμόσφαιρα και της φωτο-ανταπόκρισης του αισθητήρα OLS (Elvidge et al., 2007).



Εικόνα 9: Τα νυχτερινά φώτα DMSP/OLS για το Μιλάνο (έτος 2013), τρισδιάστατη οπτικοποίηση των τιμών DN. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019a).

Μια από τις πλέον διαδεδομένες και εύχρηστες μεθόδους διόρθωσης των κορεσμένων δεδομένων και περιγραφής της ενδοαστικής ποικιλομορφίας είναι ο δείκτης VANUI (Zhang et al., 2013). Ο δείκτης VANUI στηρίζεται στην χρήση επιπλέον δεδομένων βλάστησης (NDVI) και στην παραδοχή/παρατήρηση ότι ο βαθμός βλάστησης του αστικού ιστού έχει αντίστροφη σχέση με τον βαθμό της αστικοποίησης. Η εξίσωση του δείκτη VANUI διατυπώνεται ως εξής:

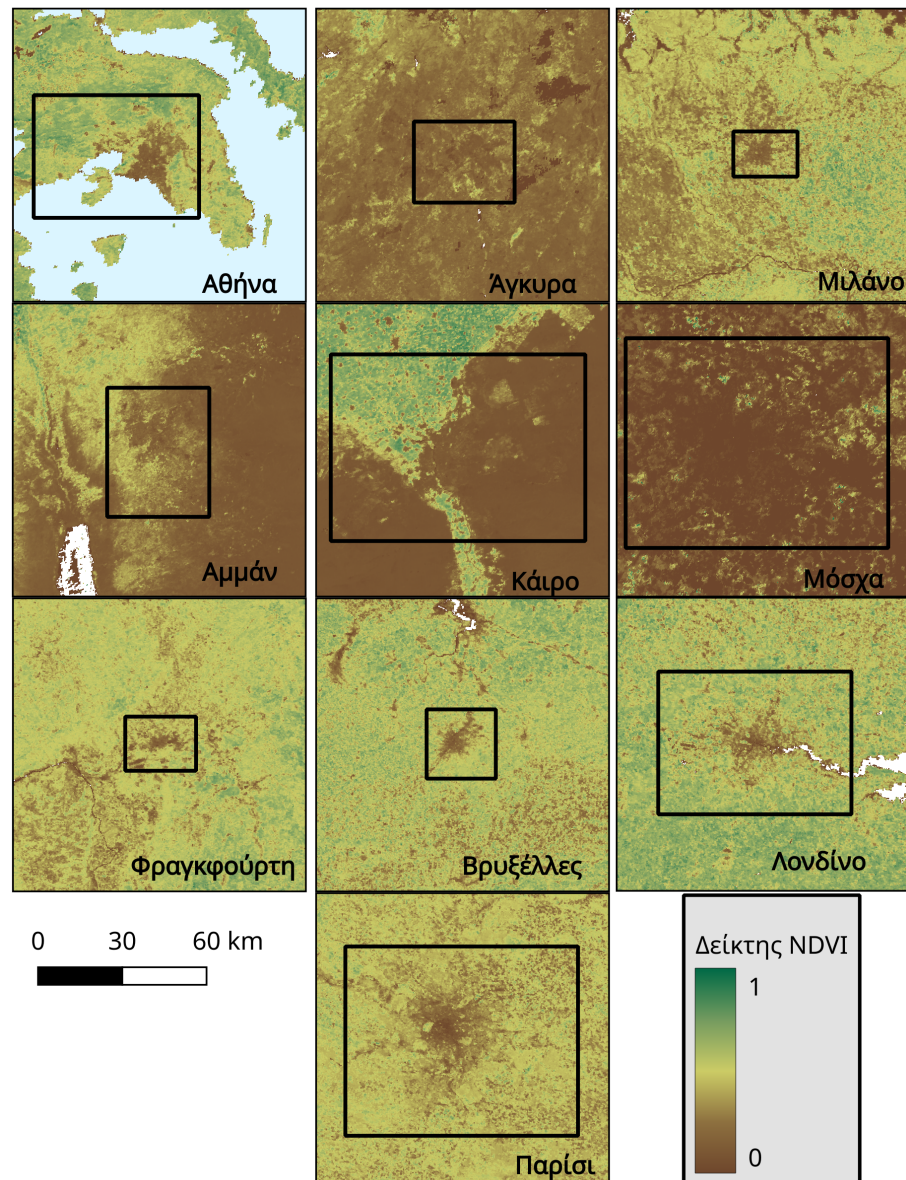
$$VANUI = (1 - NDVI_{[0,1]}) \cdot NTL_{[0,1]} \quad (3)$$

όπου  $NDVI_{[0,1]}$  οι θετικές τιμές του δείκτη NDVI,

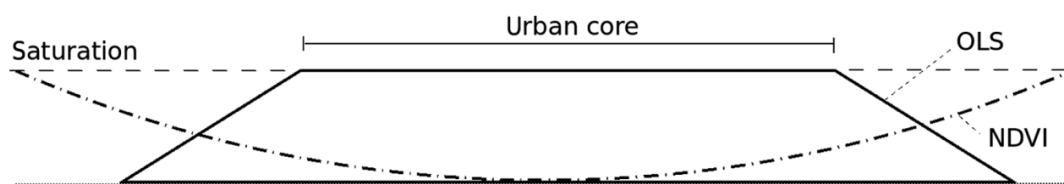
$NTL_{[0,1]}$  τα δεδομένα DMSP/OLS κανονικοποιημένα στην κλίμακα  $[0 - 1]$

Με την χρήση του εν λόγω δείκτη, η βλάστηση χρησιμοποιείται για να διορθώσει περιοχές που εσφαλμένα καταγράφονται σαν φωτεινές και άρα αστικές. Ο δείκτης ακολουθεί την λογική ότι ο αστικός πυρήνας έχει περιορισμένη βλάστηση και κατά συνέπεια περισσότερο δομημένο χώρο (φωτεινές περιοχές,  $NTL \rightarrow 1$ ). Αντιθέτως περιοχές με έντονη βλάστηση ( $NDVI \rightarrow 1$ ) έρχονται σε ασυμφωνία με το δομημένο αστικό περιβάλλον και κατά συνέπεια ο δείκτης της αποδίδει σαν μη αστικό περιβάλλον (ή διαβάθμιση της έντασης της αστικότητας ανάλογα με την μιξη των δεδομένων NDVI και DMSP/OLS, βλ. Διάγραμμα 3). Σε άγονο/γυμνό έδαφος όμως δεν υπάρχει ούτε δομημένο περιβάλλον με φωτεινές πηγές αλλά ούτε βλάστηση. Στον Χάρτη 12 αποδίδεται ο δείκτης NDVI για τις περιοχές μελέτης. Ο δείκτης VANUI έχει εφαρμοστεί σε αρκετές περιπτώσεις με καλά αποτελέσματα (Stathakis, 2015· Stathakis και Savin, 2018· Zhang et al., 2013) ενώ έχει προταθεί και παραλλαγή του (Zhuo et al., 2015).





Χάρτης 12: Ο δείκτης βλάστησης NDVI στις περιοχές μελέτης της μεθόδου βελτίωσης των δεδομένων DMPS/OLS. (Πηγή: MODIS MOD13A3, ίδια επεξεργασία).



Διάγραμμα 3: Βασική λειτουργία του VANUI. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019a).

Ωστόσο και ο δείκτης VANUI έχει τρωτά σημεία. Πιο περιοριστικός παράγοντας στην χρήση του δείκτη VANUI είναι οι περιπτώσεις αστικού τοπίου όπου εκλείπει η βλάστηση και κατά συνέπεια η δυνατότητα διόρθωσης των δεδομένων. Ο δείκτης λαμβάνει σαν

δεδομένο ότι η έλλειψη βλάστησης είναι αστικό περιβάλλον ωστόσο μια τέτοια παραδοχή είναι εσφαλμένη δεδομένου ότι έλλειψη βλάστησης μπορεί να υπάρχει και σε γυμνό έδαφος. Η καινοτομία της τρέχουσας έρευνας είναι η εισαγωγή στην εξίσωση της διόρθωσης του κορεσμού μιας επιπλέον μεταβλητής δεδομένων, των δεδομένων SAR, QuickSCAT/Seawinds.

Το μέγεθος της φωτεινότητας και της βλάστησης σε μια περιοχή εκφράζονται μαθηματικά με τις εξισώσεις 5 και 6 οι οποίες στηρίζονται στην ευρύτερη έννοια του «Συνολικού Φωτός» (SoL) (Elvidge et al., 2011):

$$SoL = \sum_i DN_i \quad (4)$$

όπου  $DN_i$  είναι η τιμή του ψηφιακού αριθμού του φωτός (Digital Number) ενός pixel σε μια περιοχή.

Ο κανονικοποιημένος δείκτης του SoL, ( $nSoL$ ), είναι το φωτιζόμενο ποσοστό της περιοχής μελέτης, τότε έχουμε:

$$nSoL = \frac{SoL}{63 \cdot n} = \frac{\sum_i DN_i}{n \cdot 63} \quad (5)$$

όπου  $SoL$  είναι το άθροισμα του φωτός και  $n$  είναι το πλήθος των pixels στην περιοχή μελέτης. Το ποσοστό της περιοχής μελέτης που καλύπτεται από βλάστηση ( $SoV$ ) είναι:

$$SoV = \frac{\sum_i NDVI_i}{n} \quad (6)$$

όπου  $NDVI_i$  είναι ο δείκτης βλάστησης κανονικοποιημένης διαφοράς NDVI για κάθε pixel και  $n$  είναι το πλήθος των pixels στην περιοχή μελέτης.

Στον Πίνακα 9 παρατίθενται ο δείκτης  $SoV$  και  $nSoL$  για τις περιοχές μελέτης.

Περιοχή μελέτης	SoV	nSoL
Αμμάν	0,16	0,57
Άγκυρα	0,29	0,21
Αθήνα	0,26	0,27
Βρυξέλλες	0,59	0,82
Κάιρο	0,20	0,57
Λονδίνο	0,60	0,65
Μιλάνο	0,53	0,58



Πίνακας 9 συνέχεια από την προηγούμενη σελίδα

Περιοχή μελέτης	SoV	nSoL
Μόσχα	0,51	0,12
Φραγκφούρτη	0,61	0,47

Πίνακας 9: Οι περιοχές ενδιαφέροντος στην μέθοδο βελτίωσης των δεδομένων DMSP/OLS και τα χαρακτηριστικά τους. SoV είναι το ποσοστό της περιοχής που καλύπτεται από βλάστηση και nSoL είναι το ποσοστό της περιοχής που είναι φωτισμένο. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019a).

Άλλη μία μέθοδος για την διορθώση των τιμών των δεδομένων DMSP/OLS είναι ο δείκτης Temperature Vegetation Adjusted Night Time Lights Urban Index (TVANUI) (Zhang και Li, 2018). Ο δείκτης TVANUI εισάγει την θερμοκρασία ως επιπλέον μεταβλητή για να επιτευχθεί η διόρθωση και εκφράζεται μαθηματικά με την σχέση:

$$TVANUI = \frac{\arctan\left(\frac{LST}{NDVI}\right)}{\frac{\pi}{2}} \cdot NTL \quad (7)$$

όπου  $NTL$  είναι οι τιμές  $OLS$  και  $LST$  είναι η θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους.

Έχει παρατηρηθεί ότι η θερμοκρασία του εδάφους ( $LST$ ) είναι υψηλότερη στις αστικές περιοχές από τον περιαστικό χώρο και ότι οι παραλλαγές της σχετίζονται με τις επιμέρους χρήσεις γης και την κάλυψη γης (Zhang και Li, 2018). Επομένως, συνδυαστικά με τον δείκτη VANUI αποτελεί μια εναλλακτική πρόταση για την ενίσχυση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του.

Στην συνέχεια και με βάση την αποδεδειγμένη συνεισφορά των δεδομένων SAR στην ερμηνεία του αστικού τοπίου προτάθηκε μέθοδος με στόχο την περαιτέρω βελτίωση των DMSP/OLS<sup>1</sup>. Η προτεινόμενη μέθοδος (Stathakis και Liakos, 2019a) βελτίωσης και διόρθωσης των δεδομένων DMSP/OLS με την προσθήκη των δεδομένων SAR εκφράζεται από την κάτωθι μαθηματική έκφραση:

$$SANUI = (1 - NDVI_{[0,1]}) \cdot NTL_{[0,1]} \cdot S_{[0,1]} \quad (8)$$

όπου  $NDVI_{[0,1]}$  είναι οι θετικές τιμές του δείκτη NDVI,  $NTL_{[0,1]}$  είναι τα δεδομένα DMSP/OLS κανονικοποιημένα στην κλίμακα  $[0, 1]$ ,  $S_{[0,1]}$  είναι οι ψηφιακές τιμές

<sup>1</sup>Ο κώδικας για την διεξαγωγή της έρευνας και τα αποτελέσματα των case studies είναι διαθέσιμα σε σχετικό αποθετήριο: <https://github.com/kokkytos/sanui>

(DN) των δεδομένων SeaWinds κανονικοποιημένα στην κλίμακα  $[0, 1]$  (διαιρούμενες με την μέγιστη τιμή τους).

Στην αξιολόγηση της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν τα σύνθετα (composites) μηνιαίων νυχτερινών φώτων snpp-VIIRS, διορθωμένα από το αδέσποτο φως (stray light corrected) του Ιανουαρίου 2014, τα βαθμονομημένα δεδομένα DMSP/OLS του 2010 και ο συντελεστής συσχέτισης των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου δείκτη με αυτά.

## 3.2 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ VIIRS

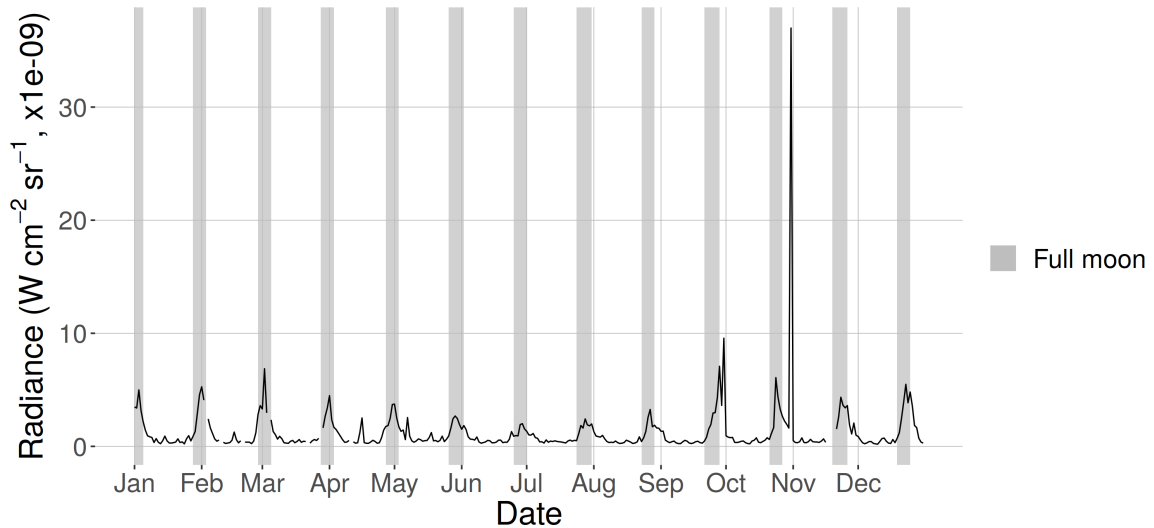
### 3.2.1 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΣΕΛΗΝΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Οι τιμές της ακτινοβολίας στα δεδομένα snpp-VIIRS Day-Night Band (DNB) αυξάνονται σε μεγάλο βαθμό από την σεληνιακή ακτινοβολία (έχει αναφερθεί 2 ως 3 φορές επιπλέον, Cao και Bai, 2014· Mann et al., 2016. βλ. Διάγραμμα 4). Απόρροια αυτού είναι να διαστρεβλώνεται πιθανή χρήση των δεδομένων νυχτερινών φώτων ως ερευνητικό εργαλείο για την παρακολούθηση των αστικών λειτουργιών στον χώρο και την ερμηνεία του αστικού τοπίου. Για την ορθή χρήση των δεδομένων νυχτερινών φώτων και την εξάλειψη της σεληνιακής ακτινοβολίας έχουν καταγραφεί δύο πρακτικές.

Στην πρώτη περίπτωση, εξαιρούνται δεδομένα τα οποία έχουν έντονη επίδραση από την σεληνιακή ακτινοβολία (Elvidge et al., 2017, Baugh et al., 2013, Fan et al., 2019). Στην περίπτωση αυτή η επιλογή βασίζεται σε κριτήρια που αφορούν την φάση της σελήνης και την συναρτώμενη από αυτήν φωτεινότητα (illuminance). Από ένα κατώφλι τιμών σεληνιακής φωτεινότητας (μονάδες μέτρησης τα lux) και άνω, τα δεδομένα νυχτερινών φώτων εξαιρούνται από την έρευνα.

Στην δεύτερη περίπτωση, στόχος είναι ο υπολογισμός και η αφαίρεση των τιμών της σεληνιακής ακτινοβολίας από τα δεδομένα νυχτερινών φώτων (Zhao et al., 2018, Cao et al., 2013, Román και Stokes, 2015, Román et al., 2018, Cole et al., 2017), πρακτική η οποία δοκιμάστηκε στην τρέχουσα έρευνα.

Για την αφαίρεση της ακτινοβολίας από τα πρωτογενή δεδομένα δοκιμάστηκαν δύο μέθοδοι σε διαφορετικές περιοχές μελέτης και σύνολα δεδομένων. Η διόρθωση με το μοντέλο Miller και με δεδομένα BRDF και η διόρθωση με την μέθοδο Dark Object Subtraction.



Διάγραμμα 4: Διάμεσος τιμών νυχτερινής ακτινοβολίας snrp-VIIRS για την Αττική το 2018. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019b).

### 3.2.1.1 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MILLER ΚΑΙ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ BRDF

Μέσω αυτής της μεθόδου επιχειρείται μια εκτίμηση της έντασης της σεληνιακής ακτινοβολίας. Το μέγεθος της σεληνιακή ακτινοβολίας που καταγράφεται στον αισθητήρα snrp-VIIRS, ανακλώμενη από την επιφάνεια της γης, είναι συνδυασμός μια σειράς μεταβλητών όπως οι αποστάσεις μεταξύ γης, σελήνης και ήλιου, της φάσης και αντανάκλαστικότητας της σελήνης και της ζενιθιακής γωνίας του φεγγαριού σε σχέση με την επιφάνεια της γης. Για την εκτίμηση της εισερχόμενης στην γήινη ατμόσφαιρα σεληνιακής ακτινοβολίας (toar) χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο *Spectral Lunar Irradiance Model MT2009* (Miller και Turner, 2009). Για τον υπολογισμό της σεληνιακής ακτινοβολίας (lunar irradiance) που καταγράφεται από τον αισθητήρα snrp-VIIRS χρησιμοποιήθηκε η μαθηματική σχέση (Román et al., 2018):

$$L_m = \frac{E_m}{\pi} \cdot BRDF \cdot \cos(\theta_m) \quad (9)$$

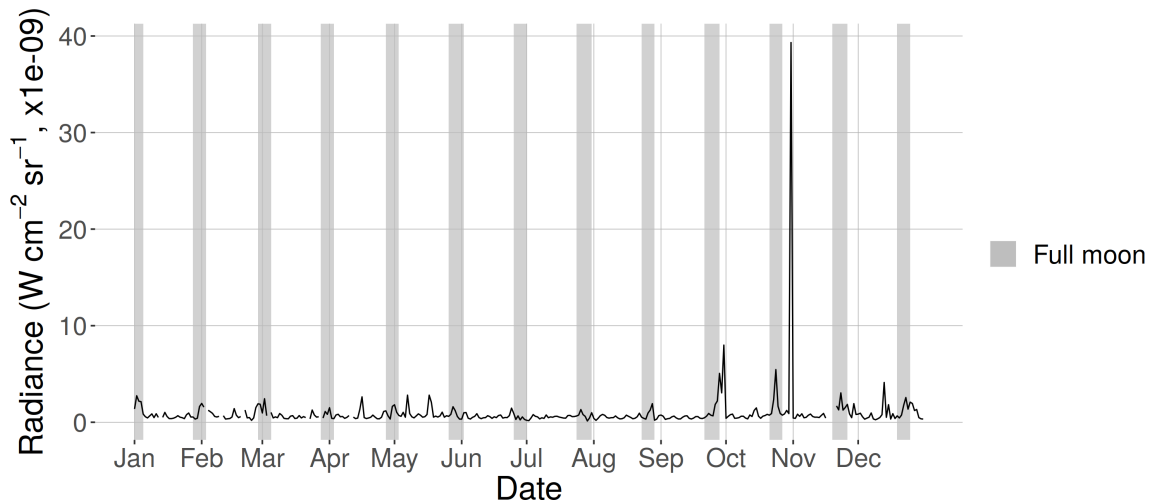
όπου  $E_m$  είναι η σεληνιακή ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας (TOA lunar irradiance) όπως προκύπτει από το μοντέλο *MT2009* σταθμισμένη με την spectral response function του snrp-VIIRS, δεδομένα αντανάκλαστικότητας BRDF (Schaaf et al., 2018) είναι ο μέσος όρος των καναλιών M4,M5,M7.  $\theta_m$  είναι η σεληνιακή ζενιθιακή γωνία η οποία είναι καταγεγραμμένη σαν συνοδευτικό dataset στα δεδομένα snrp-VIIRS SDR.

Τα δεδομένα αντανakλαστικότηταs αφορούν λήψεις ημέρας. Η καθαρή ακτινοβολία που προκύπτει είναι:

$$L' = L - L_m \quad (10)$$

όπου  $L$  και  $L'$  είναι η ακτινοβολία των πρωτογενών και διορθωμένων νυχτερινών φώτων αντίστοιχα και  $L_m$  η εκτιμώμενη σεληνιακή ακτινοβολία.

Στο Διάγραμμα 5 απεικονίζεται ο διάμεσος των διορθωμένων τιμών ακτινοβολία για την Αττική το 2018.



Διάγραμμα 5: Διάμεσος διορθωμένων τιμών ακτινοβολίας snrp-VIIRS για την Αττική το 2018. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019b).

Όπως παρατηρείται συγκριτικά με το Διάγραμμα 4 η περιοδική αύξηση που παρατηρείται κατά τις περιόδους της πανσελήνου μετριάζεται. Η μέθοδος ωστόσο απαιτεί σημαντικό όγκο συμπληρωματικών δεδομένων, εφαρμογή σύνθετων μαθηματικών μοντέλων και υπερβολικούς υπολογιστικούς πόρους. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά δυσχεραίνουν την εφαρμογή της για μεγάλες χρονοσειρές και εκτεταμένες περιοχές μελέτης.

### 3.2.1.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ DARK OBJECT SUBTRACTION

Στην τρέχουσα ενότητα για την διόρθωση των νυχτερινών δεδομένων από τις παραμορφώσεις της σεληνιακής ακτινοβολίας διερευνάται η αξιοποίηση μεθόδων από τον τομέα της τηλεπισκόπησης ημερήσιων δεδομένων. Δοκιμάζεται η μέθοδος Dark Object Subtraction (Stathakis και Liakos, 2019b). Μία μέθοδος, λιγότερο απαιτητική όσο αφορά τον όγκο των δεδομένων και τους υπολογιστικούς πόρους. Χρονικά η έρευνα με αυτή την μέθοδο αφορά την περίοδο από 3 Σεπτεμβρίου 2017 ως 31 Δεκεμβρίου 2018.

Η εμπειρική μέθοδος *Dark object subtraction* υπολογίζει έμμεσα την σεληνιακή ακτινοβολία μέσω μιας περιοχής αναφοράς (όχι απαραίτητα εντός των ορίων της περιοχής μελέτης). Η περιοχή αυτή πρέπει να διαθέτει τα παρακάτω ιδιαίτερα χαρακτηριστικά:

- να μην διέρχονται πλοία τα οποία επηρεάζουν την χαμηλή φωτεινότητα της περιοχής
- να μην επηρεάζεται από φώτα μικρών νησίδων
- η περιοχή να μην επηρεάζεται από ακραίες τιμές τεχνητού φωτισμού όπως πόλεις και φώτα στην ακτογραμμή που συμβάλλουν στον υπερ-φωτισμό στην θάλασσα (overglow),
- να περιλαμβάνει συνδυασμό από χερσαία εδάφη και θαλάσσια περιοχή ώστε να αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείγμα αντανάκλαστικότητας
- να είναι στατιστικά ισχυρό το πλήθος των pixel που θα χρησιμοποιηθούν.

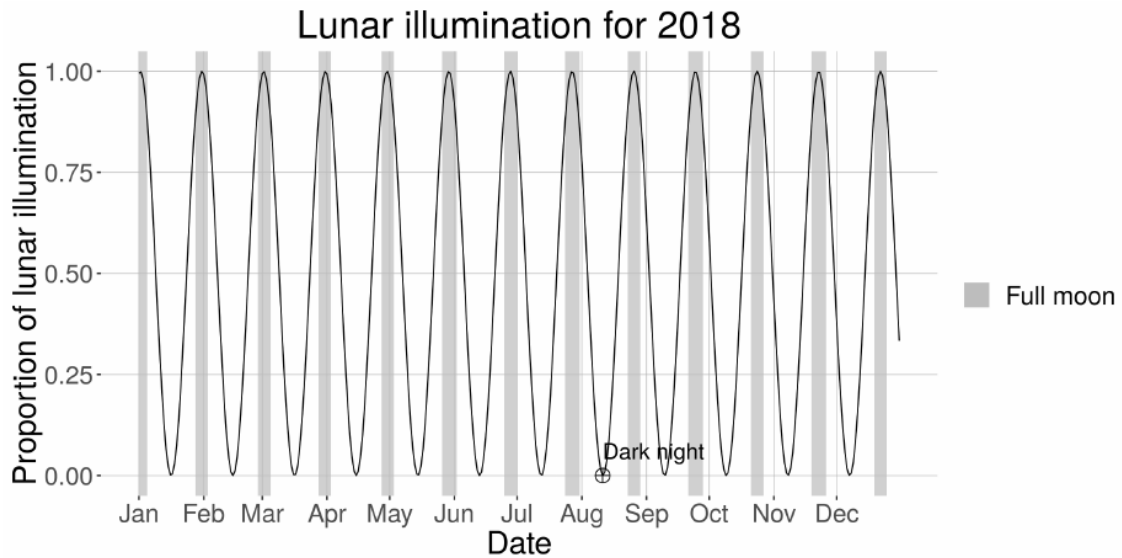
Ως περιοχή Dark Object επιλέχθηκε η νότια Κύθος. Στην συνέχεια υπολογίζεται ο διάμεσος των τιμών των pixel του Dark Object ( $L^D$ ). Ο διάμεσος είναι καταλληλότερος από τον μέσο όρο γιατί είναι λιγότερο ευαίσθητος σε ακραίες τιμές (όπως π.χ. αυτές που προκαλούνται από εφήμερα φώτα).

Τα δεδομένα της χρονοσειράς δεν είναι πλήρη, λόγω ελλিপών δεδομένων που προκύπτουν από την εφαρμογή των τιμών επισήμανσης (flags). Έτσι για ορισμένες νύχτες δεν υπάρχουν τιμές για τον διάμεσο. Και επειδή η φωτεινότητα της σελήνης είναι περιοδικό φαινόμενο οι τιμές των διάμεσων που λείπουν προβλέφθηκαν με μέθοδο παρεμβολής (spline interpolation), (Hyndman και Athanasopoulos, 2014).

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6 κάθε νύχτα νέας σελήνης με νεφοκάλυψη μικρότερη του 10 % μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ημερομηνία αναφοράς του *Dark object*.

Η λογική της μεθόδου περιγράφεται ως εξής. Για όλες τις εικόνες της χρονοσειράς του *Dark object* υπολογίζεται ο διάμεσος των τιμών της ακτινοβολίας τους. Αυτή η χρονοσειρά των διάμεσων που προκύπτει, λόγω των φίλτρων που εφαρμόστηκαν, έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- ακραίες τιμές (outliers). Αυτές οι τιμές εντοπίστηκαν και αφαιρέθηκαν.
- κενές τιμές λόγω μη ύπαρξης δεδομένων στην συγκεκριμένη εικόνα (προέκυψαν από την διαδικασία καθαρισμού και εφαρμογής flags).



Διάγραμμα 6: Επιλογή της ημερομηνίας αναφοράς του Dark Object όπου αποδίδεται η ελάχιστη δυνατή φωτεινότητα. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019b).

Οι κενές τιμές στην χρονοσειρά των διαμέσων συμπληρώθηκαν με παρεμβολή (interpolation) με την συνάρτηση `splinefun` (μεθοδο "monoH.FC") της R. Επιπλέον, για την ομαλοποίηση της χρονοσειράς προσαρμόστηκε cubic smoothing spline (`smooth.spline` πακέτο στην R). Από αυτήν την χρονοσειρά διαμέσων επιλέγεται μια ημερομηνία που έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- λαμβάνεται η πιο σκοτεινή νύχτα του έτους. Η προσέγγιση της πιο σκοτεινής νύχτας έγινε με τον εντοπισμό των ελάχιστων τιμών σεληνιακής φωτεινότητας.
- σε συνδυασμό με την επάρκεια «καθαρών» δεδομένων έτσι όπως αυτά προκύπτουν κατόπιν της εφαρμογής των φίλτρων (νέφη, edge-of-swath κτλ). Το όριο για την επάρκεια δεδομένων έχει οριστεί στο 90 % πληρότητας.

Αφού εντοπιστεί η κατάλληλη ημερομηνία/εικόνα της χρονοσειράς, υπολογίζεται η διαφορά των διαμέσων (median) των τιμών της κάθε εικόνας της χρονοσειράς με τον διάμεσο των τιμών της εικόνας αναφοράς. Η διαφορά αυτή είναι ο συντελεστής διόρθωσης ( $c_i$ ) και ουσιαστικά αποδίδει την επίδραση της σεληνιακής ακτινοβολίας.

$$c_i = L_i^D - L_{223}^D \quad (11)$$

όπου,  $c_i$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης για κάθε νύχτα,  $L_i$  είναι ο διάμεσος των τιμών της ακτινοβολίας για κάθε νύχτα στην περιοχή του Dark Object και  $L_{223}$  ο αντίστοιχος διάμεσος κατή την ημερομηνία αναφοράς. Η ημερομηνία αναφοράς που προκύπτει από

την εφαρμογή της μεθόδου είναι η 11 Αυγούστου 2018 (ή η ημέρα 223 σύμφωνα με την Ιουλιανή αρίθμηση των ημερών του έτους).

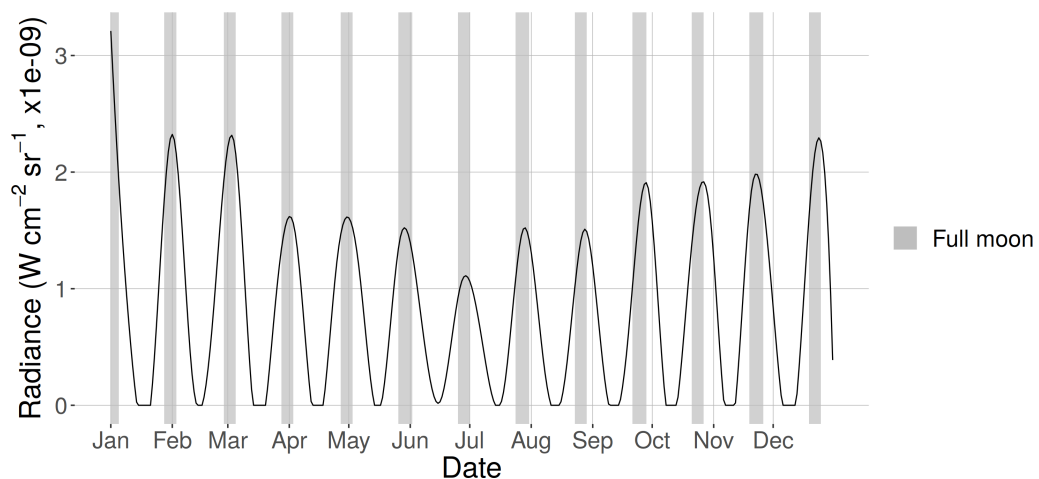
$$L_{223}^D = 0.078 n W cm^{-2} sr^{-1} \quad (12)$$

Προκύπτει κατ' αυτόν τον τρόπο μια νέα χρονοσειρά που οι τιμές της είναι οι διαφορές των διάμεσων, ο συντελεστής διόρθωσης, και ουσιαστικά αντιπροσωπεύουν τις τιμές της σεληνιακής ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε κάθε χρονική στιγμή της χρονοσειράς (βλ. Διάγραμμα 7). Για να διορθώσουμε την ακτινοβολία των εικόνων snpp-VIIRS από την σεληνιακή ακτινοβολία στην περιοχή μελέτης αρκεί να αφαιρέσουμε τις τιμές του συντελεστή διόρθωσης.

Για την διόρθωση της σεληνιακής ακτινοβολίας στην περιοχή μελέτη εφαρμόζεται ο συντελεστής διόρθωσης:

$$L'_i = \begin{cases} L_i - c_i, & \text{if } c_i \geq 0. \\ L_i, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

όπου,  $L$  και  $L'_i$  τα πρωτογενή και τα διορθωμένα δεδομένα αντίστοιχα και  $c_i$  ο συντελεστής διόρθωσης κατά την Ιουλιανή ημέρα  $i$ .



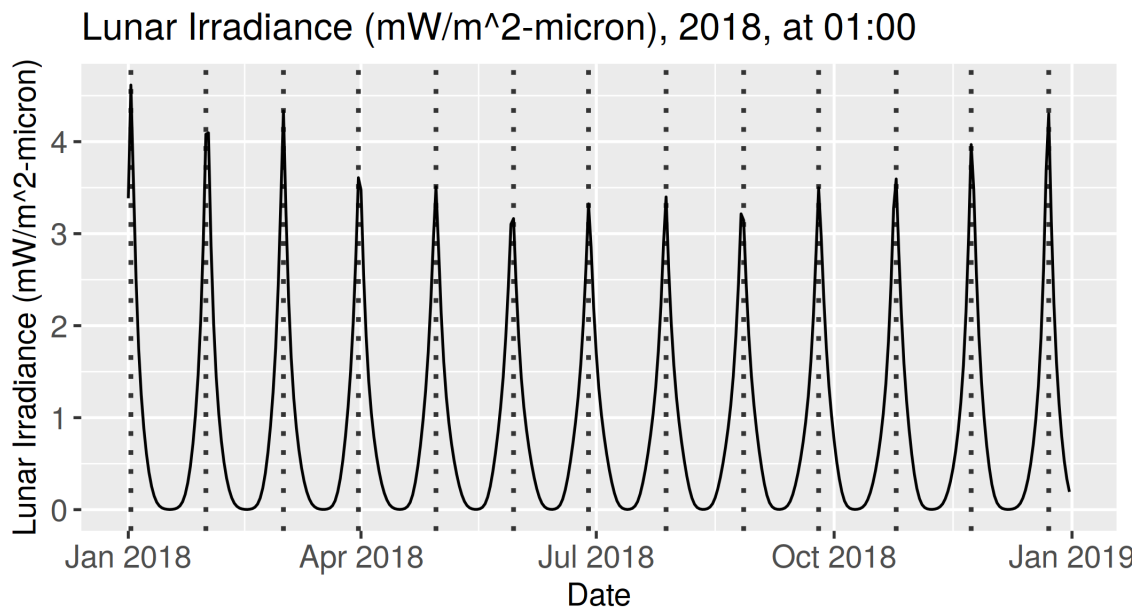
Διάγραμμα 7: Ο συντελεστής διόρθωσης Dark Object για το 2018. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019b).

### 3.2.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ MEDIAN SHIFT

Η προτεινόμενη μέθοδος διόρθωσης της σεληνιακής ακτινοβολίας στα δεδομένα snpp-VIIRS μπορεί να διαφοροποιηθεί με στόχο την περαιτέρω απλοποίηση της εφαρμογής της



και την απόδοση μιας λιγότερο παραμορφωμένης χρονοσειράς. Όπως προαναφέρθηκε, η σεληνιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στην επιφάνεια της γης και στην συνέχεια αντανακλάται στον αισθητήρα είναι συνάρτηση της φάσης της σελήνης, του σεληνιακού κύκλου, αλλά και των αποστάσεων που ορίζει η γεωμετρία γη-σελήνη-ήλιος (Elvidge et al., 2017, Cao et al., 2013, Mann et al., 2016, Cao και Bai, 2014). Η περιοδικότητα της έντασης της σεληνιακής ακτινοβολίας (που υπολογίστηκε με βάση το μοντέλο των Miller και Turner, 2009) για ένα έτος αποδίδεται παραστατικά στο Διάγραμμα 10.



Εικόνα 10: Η μεταβολή της σεληνιακής φωτεινότητας στις 01:00 πμ το 2018. (Οι κάθετες γραμμές με σημεία αντιστοιχούν στις πανσελήνους). (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2020b).

Κατά συνέπεια, για την εκμετάλλευση των νυχτερινών φώτων σε έρευνες αστικής δυναμικής απαιτείται η απαλοιφή της σεληνιακής ακτινοβολίας και των παραμορφώσεων που επιφέρει αυτή στα χρηστικά δεδομένα. Έχουν προταθεί διαφορετικές μεθοδολογίες για την επιδίωξη αυτού του αποτελέσματος.

Στην πιο απλή περίπτωση, η διόρθωση αφορά την πλήρη αγνόηση και απαλοιφή από την χρονοσειρά των δεδομένων που επηρεάζονται έντονα από την σεληνιακή επίδραση, των νυχτερινών δεδομένων πιο συγκεκριμένα που είναι ημερολογιακά πιο κοντά στις πανσελήνους (Elvidge et al., 2017, Fan et al., 2019, Baugh et al., 2013). Η παραπάνω διαδικασία αφορά τον υπολογισμό της φωτεινότητας της σελήνης σε δεδομένο τόπο και χρόνο, ανάλογα την μελέτη περίπτωσης. Ο υπολογισμός της φωτεινότητας γίνεται με βάση το μοντέλο US NAVY (Janiczek et al., 1987), το οποίο δέχεται σαν παραμέτρους την γεωγραφική θέση, την ημερομηνία και ώρα και την ορατότητα του ουρανού (στην τρέχουσα

έρευνα ορίστηκε ως καθαρός ουρανός, ελλείπει μετεωρολογικών δεδομένων). Τέλος, σε όσες εικόνες καταγράφεται, με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία (Elvidge et al., 2017), φωτεινότητα  $> 0.0005$  lx αυτές αφαιρούνται από την χρονοσειρά.

Μια άλλη κατηγορία μεθόδων για την αφαίρεση της σεληνιακής ακτινοβολίας είναι με εμπειρικές τεχνικές με κατά περίπτωση συντελεστές διόρθωσης. Στην τρέχουσα έρευνα, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, έχει προταθεί η μέθοδος Dark Object Subtraction (Stathakis και Liakos, 2019b), κατά την οποία επιλέγεται μια σκοτεινή περιοχή. Στην συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής διόρθωσης για κάθε νύχτα, ο οποίος είναι η διαφορά της διάμεσης τιμής της ακτινοβολίας από την διάμεση τιμή κατά την νέα σελήνη (όπου ελαχιστοποιείται η σεληνιακή επίδραση). Τα διορθωμένα δεδομένα προκύπτουν από τον τύπο:

$$L' = L - L_m \quad (14)$$

όπου  $L$  και  $L'$  είναι τα πρωτογενή και διορθωμένα δεδομένα αντίστοιχα και  $L_m$  είναι η υπολογιζόμενη σεληνιακή ακτινοβολία.

Τέλος, η τρίτη τεχνική για την αφαίρεση της σεληνιακής ακτινοβολίας από τα δεδομένα νυχτερινών φώτων στηρίζεται σε εκτεταμένες και απαιτητικές μεθόδους (Cao et al., 2013· Cole et al., 2017· Román και Stokes, 2015· Román et al., 2018· Zhao et al., 2018). Η σεληνιακή ακτινοβολία υπολογίζεται με τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$L_m = \frac{E_m}{\pi} \cdot \rho \cdot \cos(\theta_m) \quad (15)$$

όπου  $\theta_m$  είναι η σεληνιακή ζενιθιακή γωνία η οποία είναι καταγεγραμμένη σαν συνοδευτικό dataset στα δεδομένα snpp-VIIRS, η παράμετρος  $E_m$  είναι η σεληνιακή ακτινοβολία στην κορυφή της ατμόσφαιρας (TOA lunar irradiance) η οποία προκύπτει από το μοντέλο Spectral Lunar Irradiance Model (MT2009) για δεδομένη ημερομηνία και ώρα (Miller και Turner, 2009). Το  $\rho$  είναι ο μέσος όρος των καναλιών M4,M5,M7, είτε δεδομένων Reflectance (προϊόν VIIRS VNP09GA) (Cao et al., 2013) είτε δεδομένων Bidirectional Reflectance Distribution Function (προϊόν VIIRS VNP43MA) (Román et al., 2018). Η διόρθωση γίνεται με βάση την μαθηματική σχέση 15 αφότου έχει υπολογιστεί το  $L_m$ .

Εν κατακλείδι, η πρώτη περίπτωση διορθώσεων αποκλείει αρκετά δεδομένα από την χρονοσειρά, η δεύτερη περίπτωση είναι εύκολη στην χρήση αλλά τα αποτελέσματα της

διόρθωσης δεν είναι ικανοποιητικά ενώ η τρίτη περίπτωση απαιτεί μια σειρά συμπληρωματικών δεδομένων, υπερβολική προεπεξεργασία και εκτεταμένους υπολογισμούς.

Στο τρέχον κεφάλαιο προτάθηκε μια επιπλέον τεχνική, που ανήκει στην κατηγορία των εμπειρικών μεθόδων, για την διόρθωση των δεδομένων snpp-VIIRS “Black Marble” από την σεληνιακή ακτινοβολία (Stathakis και Liakos, 2020a· Stathakis και Liakos, 2020b). Η περιοχή μελέτης για την δοκιμή της μεθόδου είναι η κεντρική Ελλάδα, στην οποία περιλαμβάνεται και η Αθήνα (βλ. λεπτομέρειες στην ενότητα 2.2).

Η μέθοδος στηρίζει την λογική της διόρθωσης στο γεγονός ότι η σεληνιακή ακτινοβολία είναι περιοδική παραμόρφωση. Κατά την φάση της νέας σελήνης η σεληνιακή φωτεινότητα είναι κοντά στο μηδέν. Αντίστοιχα στην φάση της πανσελήνου αυτή καταγράφει τις μέγιστες τιμές, καθώς αυξάνεται σταδιακά όσο μεγαλώνει η φάση της σελήνης. Κατά την διόρθωση, υπολογίζεται ο διάμεσος (median) των τιμών της ακτινοβολίας στην σκηνή. Ο διάμεσος προτιμήθηκε καθώς είναι λιγότερο ευαίσθητος στις ακραίες τιμές (outliers) που δεν αποδίδονται στον σεληνιακό κύκλο. Στην συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά του διαμέσου κάθε νύχτας με τον διάμεσο της νύχτας που είναι νέα σελήνη:

$$\Delta = M_i - M_{new\ moon} \quad (16)$$

όπου  $\Delta$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης (οι διαφορές των διαμέσων).  $M_i$  και  $M_{new\ moon}$  είναι ο διάμεσος της σκηνής κάθε νύχτα και της νέας σελήνης αντίστοιχα.

Το τρίτο βήμα είναι να αφαιρέσουμε τον συντελεστή διόρθωσης  $\Delta$  από κάθε νύχτα. Η διόρθωση εφαρμόζεται καθολικά σε όλα τα pixels της σκηνής.

$$DN' = \begin{cases} DN_o, & \text{if } \Delta \leq 0. \\ DN_o - \Delta, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (17)$$

όπου  $DN'$  και  $DN_o$  οι διορθωμένες και οι πρωτογενείς τιμές αντίστοιχα.

### 3.3 ΝΥΧΤΕΡΙΝΑ ΦΩΤΑ ΚΑΙ ΑΣΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

#### 3.3.1 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ DMSP/OLS

Στο παρόν κεφάλαιο η διατριβή επικεντρώνεται στην πρόβλεψη της χρονοσειράς των δεδομένων DMSP/OLS Stable Lights v.4.0. Η πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών γίνεται ανά κελί (pixel) (Stathakis et al., 2017). Στην υφιστάμενη χρονοσειρά του κάθε κελιού προσαρμόζεται ένα μοντέλο παλινδρόμησης και στην συνέχεια χρησιμοποιούνται οι παράμετροί του για την πρόβλεψη των νέων τιμών. Πριν την πρόβλεψη και εξαιτίας του γεγονότος ότι ο αισθητήρας των δεδομένων DMSP/OLS δεν έχει διαβαθμονόμηση έχει προηγηθεί διαβαθμονόμηση των δεδομένων της χρονοσειράς (Elvidge et al., 2009b· Elvidge et al., 2014)(βλ. ενότητα 2.2). Η πρόβλεψη αφορά την περίοδο 2009-2025 για την Αθήνα. Για λόγους σύγκρισης θα γίνεται και η αντίστοιχη πρόβλεψη για το Μιλάνο. Η περίοδος 2009-2013 χρησιμοποιείται για την αποτίμηση της ακρίβειας της πρόβλεψης. Η πρόβλεψη της ακτινοβολίας των δεδομένων DMSP/OLS ουσιαστικά αποδίδει και την αντίστοιχη πρόβλεψη της έντασης της αστικής δραστηριότητας στις περιοχές μελέτης.

Στην πράξη, η μέθοδος πρόβλεψης δεν προβλέπει τυχόν εξάπλωση του αστικού ιστού στον χώρο αλλά μεταβολή της έντασης της νυχτερινής ακτινοβολίας στα υφιστάμενα κελία των εικόνων με βάση το προηγούμενο ιστορικό τους. Στην συνέχεια για κάθε έτος πρόβλεψης υπολογίζεται ο δείκτης SoL σαν ένα μέτρο συνάθροισης της συνολικής ακτινοβολίας άρα και αστικής δραστηριότητας της πόλης. Έχουν δοκιμαστεί οι μέθοδοι της γραμμικής παλινδρόμησης, πολυωνυμικής παλινδρόμησης β' βαθμού και εκθετικής παλινδρόμησης.

Με τα μοντέλα πρόβλεψης μέσω παλινδρόμησης γίνεται πρόβλεψη μιας χρονοσειράς  $y$  με την υπόθεση ότι αυτή έχει σχέση με μια άλλη χρονοσειρά  $x$  (Hyndman και Athanasopoulos, 2014).

#### 3.3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ SLEUTH

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύθηκε η μεθοδολογία της πρόβλεψης της χρονοσειράς των δεδομένων DMSP/OLS. Ωστόσο η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε είχε στόχο την εκτίμηση των μελλοντικών τιμών των δεδομένων, ουσιαστικά την εκτίμηση της έντασης

της αστικής δυναμικής και όχι την πρόβλεψη της έκτασης των αστικών περιοχών. Για την εκτίμηση της αστικής εξάπλωσης στον χώρο χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SLEUTH (Clarke et al., 1997, Clarke και Gaydos, 1998)<sup>2</sup>. Το εν λόγω μοντέλο έχει τροποποιηθεί αρκετές φορές διαχρονικά προκειμένου να λάβει την τρέχουσα μορφή (Clarke, 2008). Η πρώτη εφαρμογή του έγινε στο Σαν Φρανσίσκο (Clarke και Gaydos, 1998).

Η εκτίμηση της αστική διάχυσης έγινε με την πρόβλεψη της έκτασης των νυχτερινών φώτων DMSP/OLS στον Ελλαδικό χώρο για την περίοδο 2013-2030. Το μοντέλο SLEUTH είναι ένα μοντέλο από κυψελοειδή αυτόματα (cellular automata model) το οποίο προσομοιώνει την διαδικασία της αστικής εξάπλωσης και πιο συγκεκριμένα 4 τύπους: την αυθόρμητη ανάπτυξη, τα νέα εξαπλούμενα αστικά κέντρα, την περιαστική ανάπτυξη περιρξ αστικών πυρήνων, και την διάχυση επηρεαζόμενη από το οδικό δίκτυο.

Τα κυψελοειδή αυτόματα είναι απλά μοντέλα για την προσομοίωση σύνθετων συστημάτων. Η προσομοίωση του μοντέλου βασίζεται στον ορισμό ενός χωρικού πεδίου (συνήθως κάναβος), ένα σύνολο αρχικών συνθηκών και ένα σύνολο συμπεριφορικών κανόνων. Η πολυπλοκότητα και η εξέλιξη του μοντέλου, ενεργοποιείται και επηρεάζεται κατόπιν της επαναλαμβανόμενης εφαρμογής των κανόνων επί των αρχικών συνθηκών. Η συνεισφορά των κυψελοειδών αυτομάτων στην μελέτη της αστικής δυναμικής και την μοντελοποίηση των διεργασιών της έχει ήδη αναδειχθεί κατά το παρελθόν (Couclelis, 1997, Takeyama και Couclelis, 1997).

Το μοντέλο Land Cover Deltatron Model (LCD) ενσωματώθηκε στο υφιστάμενο μοντέλο Urban Growth Model (UGM) (Chaudhuri και Clarke, 2013) και ο συνδυασμός τους απέδωσε το μοντέλο SLEUTH (το όνομα του μοντέλου είναι ακρωνύμιο από τα αρχικά των δεδομένων εισόδου που χρησιμοποιούνται σε αυτό: (S)lope, (L)and use, (E)xcluded, (U)rban, (T)ransportation, (H)illshade)). Είναι ΕΛ/ΛΑΚ και εκτελείται σε περιβάλλον UNIX, Linux και Windows.

Το μοντέλο προσομοιώνει πρότυπα αστικής εξάπλωσης που είναι συνεπή με χωρικές παρατηρήσεις παρελθόντων συμπεριφορών εξάπλωσης και δικτύων μετακίνησης (Terando et al., 2014). Επιπλέον, το μοντέλο περιορίζει την πιθανότητα αστικής εξάπλωσης σε ευαίσθητες περιοχές που επιβάλλονται περιορισμοί από χρήσεις γης και ρυθμιστικά πλαίσια, φυσικά και τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Η απλότητα του μοντέλου SLEUTH έχει το

<sup>2</sup>Το αποθετήριο για την εκτέλεση της προσομοίωσης στην διατριβή και τα αποτελέσματα της είναι διαθέσιμο στο <https://osf.io/cgu5p/>

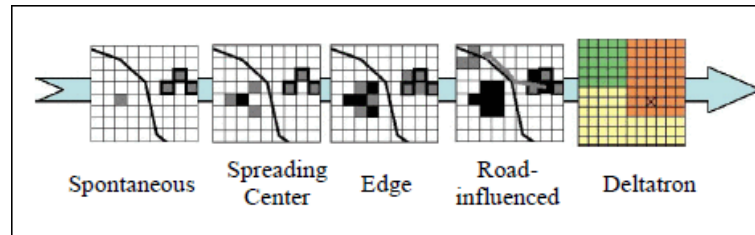
τίμημα της υπερ-απλούστευσης και γενίκευσης της πραγματικότητας, αναγκαία συνθήκη σε οποιαδήποτε μέθοδο μοντελοποίησης της πραγματικότητας και απόδοσης της σύνθετης διαδικασίας της αστικοποίησης και αστικής εξάπλωσης. Ένα από τα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι ότι μπορεί να εκτελεστεί με ευρέως διαδεδομένα σύνολα δεδομένων. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων από το μοντέλο SLEUTH θα μπορούσε να μας απαντήσει στα εξής ερωτήματα:

- Με βάση την τρέχουσα τάση, ποιός μπορεί να είναι ο ρυθμός αστικής ανάπτυξης για τα επόμενα  $x$  χρόνια για μια ταχέως αναπτυσσόμενη περιοχή;
- Η ανάπτυξη αυτή θα είναι ομοιογενής στον χώρο ή θα υπάρξει ασύμμετρη πίεση σε κάποιες περιοχές και φυσικά οικοσυστήματα;
- Υπάρχουν περιοχές οι οποίες προβλέπεται να αναδειχθούν σαν νέα κέντρα αστικής εξάπλωσης στο μέλλον;

Το μοντέλο SLEUTH είναι μετεξέλιξη του μοντέλου Urban Growth Model. Είναι δομημένο στο μοντέλο UGM (Urban Growth Model), το οποίο κάνει προσομοίωση της αστικής διάχυσης, και στο μοντέλο DLM (Deltatron Land Use/Land Cover Model) που παρακολουθεί τις αλλαγές στις χρήσεις γης. Είναι Πιθανολογικό Μοντέλο (probabilistic model) με δυαδική λογική.

Το μοντέλο προβλέπει τη αστική ανάπτυξη με βάση μια σειρά κανόνων διάχυσης, το μοτίβο των αστικών κελιών και την αλληλεπίδρασή τους με τα γειτνιάζοντα κελιά. Λειτουργεί σε δύο φάσεις: την φάση της Βαθμονόμησης (Calibration), όπου το μοντέλο αναπαράγει ιστορικά πρότυπα και τάσεις και την φάση της Πρόβλεψης (Prediction), όπου οι ιστορικές τάσεις προβάλλονται στο μέλλον. Η χρονική μονάδα μέτρησης της προσομοίωσης αστικής ανάπτυξης είναι ο κύκλος ανάπτυξης (growth cycle) και αντιστοιχεί σε ένα έτος. Η αστική δυναμική που αποδίδεται στο μοντέλο UGM, μοντελοποιείται μέσω τεσσάρων διαδοχικών κανόνων (βλ. Εικόνα 11): spontaneous new growth, organic new spreading centers, diffuse edge growth, road influenced growth (Yi και He, 2009).

Όλα τα κελιά που απαρτίζουν το grid των κυψελοειδών αυτομάτων ενημερώνονται ύστερα από την εφαρμογή κάθε κανόνα. Οι κανόνες εφαρμόζονται διαδοχικά κατά τον κύκλο ανάπτυξης και ελέγχονται από την αλληλεπίδραση 5 παραμέτρων ανάπτυξης: dispersion, breed, spread, road gravity and slope. Οι παράμετροι επηρεάζουν τον τρόπο με τον οποίο εφαρμόζονται οι κανόνες μετάβασης που περιγράφουν τον μετασχηματισμό



Εικόνα 11: Συμπεριφορικοί κανόνες του μοντέλου SLEUTH κατά τον κύκλο ανάπτυξης. (Πηγή: Yι και He, 2009).

και την ανάπτυξη του αστικού περιβάλλοντος (Yι και He, 2009). Επίσης, υπάρχει ένα σετ κανόνων, οι «αυτοτροποποιούμενοι» κανόνες (“self-modification” rules), οι οποίοι συμβάλλουν στην αποφυγή της γραμμικής και εκθετικής αστικής ανάπτυξης στο μοντέλο (Silva και Clarke, 2002). Πιο συγκεκριμένα:

- Dispersion coefficient (DI): ελέγχει πόσες φορές ένα κελί μπορεί να επιλεγεί τυχαία για αστικοποίηση κατά την εφαρμογή του κανόνα της αυθόρμητης ανάπτυξης.
- Breed coefficient (BR): καθορίζει την πιθανότητα ένα αστικοποιημένο κελί, κατά την διαδικασία της αυθόρμητης ανάπτυξης, να συμμετέχει σε έναν νέο πυρήνα αστικής εξάπλωσης. Επιπλέον, καθορίζει την διάχυση κατά μήκος του οδικού δικτύου κατά την φάση της αντίστοιχης φάσης διάχυσης.
- Spread coefficient (SP): καθορίζει την πιθανότητα ότι ένα κελί, το οποίο είναι μέρος ενός εξαπλούμενου κέντρου (μία ομάδα αποτελούμενη τουλάχιστον από δύο αστικά κελιά, σε μια σχέση γειτονίας 3x3), θα δημιουργήσει ένα νέο γειτνιαζόν αστικό κελί.
- Road gravity coefficient (RG): καθορίζει την μέγιστη απόσταση επίδρασης του κάθε δρόμου στην πιθανότητα αστικοποίησης. Εξαρτάται από τις διαστάσεις του χάρτη εισόδου.
- Slope resistance coefficient (SR): καθορίζει την βαρύτητα της πιθανότητας μιας περιοχής να δομηθεί.

Οι τέσσερις πρώτες παράμετροι καθορίζουν την αστική πίεση που συμβάλει στην αστική διάχυση. Η πέμπτη παράμετρος καθορίζει την αντίσταση στην διαδικασία αστικοποίησης από την κλίση του ανάγλυφου. Επιπλέον, σε αυτήν την παράμετρο αντίστασης στην αστική ανάπτυξη περιλαμβάνονται θεματικά επίπεδα που αποκλείουν μερικώς ή ολικώς την διάχυση (π.χ. υδάτινες επιφάνειες, εθνικά πάρκα κτλ).

Η διαβαθμονόμηση στο μοντέλο επιτυγχάνεται μέσω της μεθόδου Monte Carlo. Οι μέθοδοι Monte Carlo είναι μια σειρά από υπολογιστικές τεχνικές για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων με την χρήση τυχαίων δειγμάτων (Johansen, 2010). Πρόκειται για στοχαστική διαδικασία η οποία κάνει προσομοιώσεις με μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Η μέθοδος Monte Carlo στην περίπτωση του μοντέλου SLEUTH εφαρμόζεται σε τρεις διαφορετικές λειτουργίες: την αδρή (coarse), την μέτρια (medium) και την βέλτιστη (fine) (Υί και He, 2009). Για κάθε ομάδα παραμέτρων η προσομοίωση της διάχυσης συγκρίνεται με την πραγματική διάχυση, χρησιμοποιώντας μετρικά ελαχίστων τετραγώνων παλινδρόμησης. Επίσης, για κάθε ομάδα παραμέτρων στις επαναλήψεις Monte Carlo, το μοντέλο υπολογίζει αυτά τα μετρικά και στην συνέχεια βγαίνει ο μέσος όρος τους και συγκρίνεται με μετρήσεις για τα πραγματικά ιστορικά δεδομένα για να υπολογιστούν τέλος τα μετρικά ελαχίστων τετραγώνων παλινδρόμησης. Το μετρικό Lee-Sallee υπολογίζεται για να εκτιμηθεί η χωρική προσαρμογή (fit).

Μετά από κάθε φάση βαθμονόμησης, καθορίζεται το εύρος τιμών για την επόμενη φάση, με κριτήριο τα κορυφαία σκορ. Περιγραφικά στατιστικά μέτρα υπολογίζονται για τις ομάδες των κορυφαίων σκορ για τον εντοπισμό του κατάλληλου εύρους τιμών για την επόμενη φάση βαθμονόμησης.

Στόχος της βαθμονόμησης είναι να αποδώσει ένα σύνολο τιμών για τις παραμέτρους αστικής διάχυσης αντιπροσωπευτικές για την μοντελοποίηση της ανάπτυξης στην ιστορική περίοδο. Για την βαθμονόμηση, το πιο παλιό έτος χρησιμοποιείται για το seed και τα υπόλοιπα layers χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό στατιστικών μετρικών βέλτιστης προσαρμογής. Στην συνέχεια το μοντέλο προσομοιάζει την αστική έκταση του τελευταίου έτους από τα ιστορικά περίοδο, η οποία είναι ήδη γνωστή.

Οι παράμετροι που αποδίδονται από την βαθμονόμηση χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν τα μελλοντικά πρότυπα αστικοποίησης και αστικής διάχυσης.

Κατά την πρόβλεψη διαφορετικά σενάρια μπορούν να προταθούν για την προσομοίωση της μελλοντικής αστικής διάχυσης της πόλης.

Οι περιορισμένοι υπολογιστικοί πόροι και η αναγκαιότητα για μια ελάχιστη ικανοποιητική χωρική ανάλυση (400 m) επέβαλαν την εφαρμογή του μοντέλου στα κυριότερα μόνον αστικά κέντρα της χώρας.



### 3.3.3 ΔΕΙΚΤΗΣ ΦΩΤΟΡΥΠΑΝΣΗΣ ΜΕ ΝΥΧΤΕΡΙΝΑ ΦΩΤΑ

Στην τρέχουσα ενότητα αναπτύσσεται η μεθοδολογία για την ανάπτυξη ενός δείκτη άμεσης φωτορύπανσης. Η διαθεσιμότητα δεδομένων snpp-VIIRS σε μηνιαία βάση (Cloud free Monthly Composites) μας επιτρέπει να εφαρμόσουμε τον προτεινόμενο δείκτη για όλο το έτος.

Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή του δείκτη φωτορύπανσης απαιτεί δεδομένα νυχτερινών φώτων και ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Για την εκπόνηση της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν βαθμονομημένα δεδομένα DMSP/OLS (Stathakis, 2016b) διακριτικής ικανότητας 1000m, μηνιαία δεδομένα snpp-VIIRS (NOAA, 2016) διακριτικής ικανότητας 750m και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους SRTM (βλ. Χάρτης 2), διακριτικής ικανότητας 90m (Farr et al., 2007). Σε όλα τα δεδομένα έγινε αναδειγματοληψία (resample) στα 100m.

Ο δείκτης βασίζεται στην ανάλυση οπτικού πανοράματος (Viewshed analysis) όπου παρατηρητής είναι το κάθε pixel και στόχος η κάθε πηγή φωτός (μέγιστη απόσταση παρατήρησης τα 10 km). Η ένταση της πηγής του φωτός είναι σταθμισμένη με την απόσταση από τον παρατηρητή. Η συνολική επιβάρυνση της φωτορύπανσης που προκύπτει για τον παρατηρητή είναι το άθροισμα των επιμέρους σταθμισμένων εντάσεων φωτεινότητας των ορατών πηγών φωτεινότητας. Πιο συγκεκριμένα ο δείκτης υπολογισμού υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$v = \begin{cases} 0, & \text{if } d_i > t. \\ \frac{DN_i}{d_i}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (18)$$

όπου  $DN$  είναι η ένταση της ακτινοβολίας των νυχτερινών φώτων στο pixel στόχο  $i$  και  $d$  είναι το μήκος της απόστασης θέασης (σε km) από τον παρατηρητή στο pixel. Η απόσταση  $t$  είναι ένα κατώφλι (threshold) άνω του οποίου το pixel στόχος θεωρείται ότι είναι μη ορατό ( $t = 10$  km). Επιπλέον, το ύψος του παρατηρητή ορίστηκε στο 1,75 m ενώ το ύψος των pixel στόχων ορίστηκε στο 0 m δηλαδή στο έδαφος.

Ο δείκτης φωτορύπανσης ( $PPI$ ) για κάθε pixel ορίζεται στην συνέχεια ως εξής:

$$PPI = \sum_{(i)} (v) + DN \quad (19)$$

όπου  $v$  είναι το σταθμισμένο ορατό φως για κάθε ορατό σημείο του χώρου και  $DN$  είναι το φως που υφίσταται ήδη στον τρέχουσα θέση παρατήρησης.

Ο δείκτης της συνολική φωτορύπανσης (sum of photopollution -  $SoP$ ) προκύπτει για την παρακολούθηση της φωτορύπανσης στον χρόνο ως:

$$SoP = \sum_{(i)} (PPI) \quad (20)$$

### 3.3.4 ΕΠΟΧΙΚΟΤΗΤΑ, ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΕΠ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΝΥΧΤΕΡΙΝΩΝ ΦΩΤΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε τα νυχτερινά φώτα είναι μια υποκατάστατη μεταβλητή που μπορεί να περιγράψει μεταβλητές όπως τον πληθυσμό, την απασχόληση, το ΑΕΠ και γενικότερα την αστική και οικονομική δραστηριότητα.

Η καταγραφή αυτή της δραστηριότητας σε μικρή συχνότητα (π.χ. μήνας ή και εβδομάδα) είναι πολύ δύσκολη με τις τυπικές μεθόδους απογραφής (στην Ελλάδα στατιστική απογραφή γίνεται κάθε 10 έτη) ενώ αντίστοιχα συμπληρωματικά δεδομένα που θα μπορούσαν να δώσουν μια πιο σαφή εικόνα της εποχιακής διακύμανσης της οικονομικής και πληθυσμιακής δυναμικής μιας περιοχής ενδέχεται είτε να μην είναι διαθέσιμα στην επιστημονική κοινότητα είτε να εμπεριέχουν σφάλματα λόγω του τρόπου καταγραφής. Από την άλλη τα νυχτερινά φώτα διατίθενται ελεύθερα και δωρεάν σε τακτικά χρονικά διαστήματα (έτος, μήνας και ημέρα). Αυτή η ιδιότητα προσφέρει την ευκαιρία να περιγράψουμε την εποχικότητα της αστικής δραστηριότητας σε αναλυτική χρονική και χωρική κλίμακα. Πιο αναλυτικά αξιοποιούνται τα μηνιαία σύνθετα νυχτερινών φώτων snpp-VIIRS (διορθωμένα από το αδέσποτο φως) (NOAA, 2016), για την περίοδο Ιανουάριος 2014 - Οκτώβριος 2019.

Για την μέτρηση της εποχικότητας χρησιμοποιείται η μεθοδολογία για τον υπολογισμό του δείκτη εποχικότητας (Stathakis και Baltas, 2018). Αρχικά, για κάθε δήμο υπολογίζεται ο δείκτης  $SoL$ . Από τον υπολογισμό έχουν εξαιρεθεί πολύ μικρές τιμές που θεωρείται θόρυβος. Επειδή η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει δήμους με πολύ μικρούς οικισμούς και χαμηλές πληθυσμιακές πυκνότητες (συνήθως ορεινοί ή νησιωτικοί δήμοι) και κατά συνέπεια χαμηλές εντάσεις ακτινοβολίας, ορίστηκε σαν όριο θορύβου οι τιμές  $DN \leq 2 \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$  (βλ. τύπος 21).

$$SoL = \sum_i DN_i, \text{ for } DN > 2 \quad (21)$$

Στην συνέχεια, για να εξομαλυνθούν ακραίες ετήσιες διακυμάνσεις που σχετίζονται με ειδικές/έκτακτες διεθνείς ή τοπικές συνθήκες (π.χ. πόλεμοι, διεθνείς τουριστικές συμφωνίες, καιρικά φαινόμενα κτλ) για κάθε μήνα υπολογίζεται ο μέσος όρος των 4 ετών ως εξής:

$$S_{mean}^m = \frac{SoL_{2014}^m + SoL_{2015}^m + SoL_{2016}^m + SoL_{2017}^m}{4} \quad (22)$$

όπου  $m[1, 12]$  είναι ο μήνας του έτους.

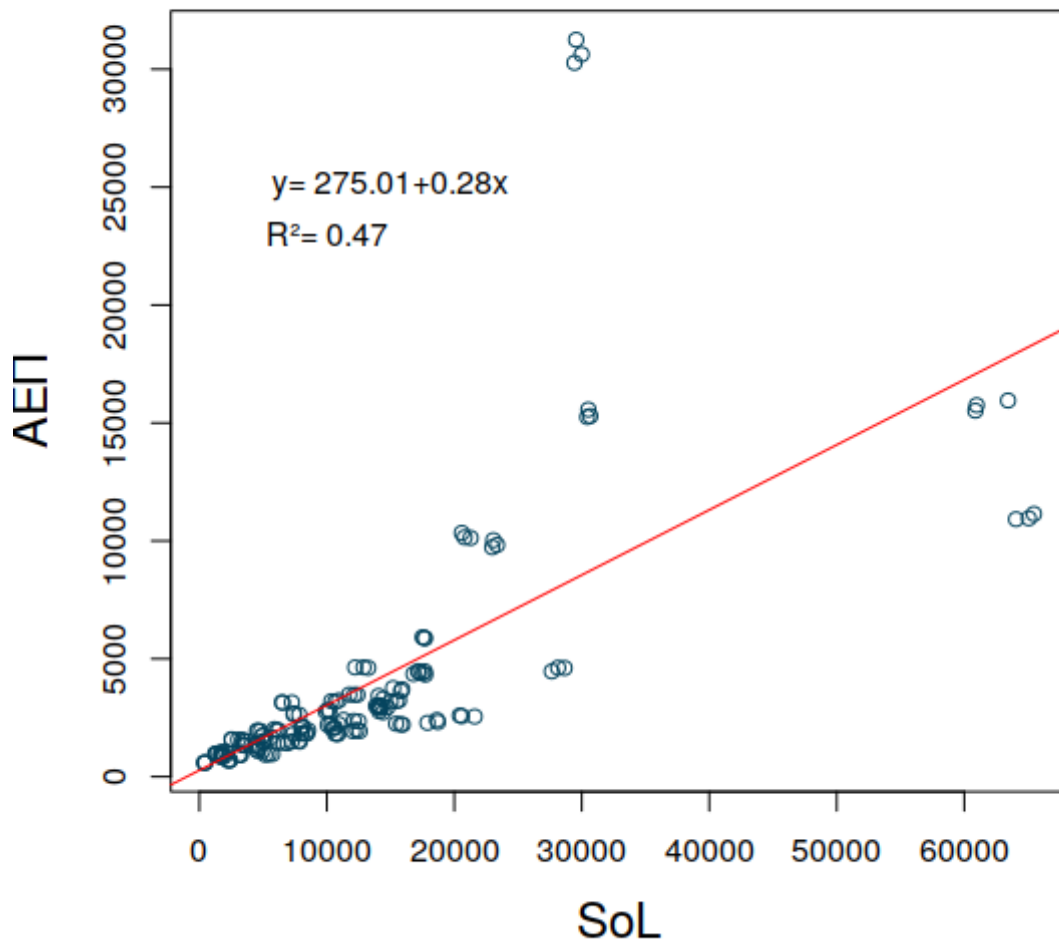
Κατόπιν υπολογίζεται ο δείκτης εποχικότητας ως εξής:

$$S_{obs}^m = \frac{SoL^m}{SoL_{March}} \quad (23)$$

όπου  $m[1, 12]$  είναι ο μήνας του έτους. Ο δείκτης εκφράζει (με όρους νυχτερινών φώτων) την δραστηριότητα του κάθε μήνα συγκριτικά με τον Μάρτιο που θεωρείται ο μήνας με την πιο χαμηλή δραστηριότητα. Τα μηνιαία σύνθετα δεν έχουν περάσει από διαδικασία αφαίρεσης ακραίων τιμών. Κατά συνέπεια, για να εξαιρεθούν ακραίες τιμές από τα αποτελέσματα του δείκτη, που προκύπτουν από ακραίες τιμές ή ελλιπή δεδομένα λόγω αφαίρεσης θορύβου (π.χ. πυρκαγιές) των δεδομένων snpp-VIIRS, εφαρμόστηκαν μια σειρά από κανόνες. Πιο συγκεκριμένα:

- αν  $SoL_{obs}^m < \frac{SoL_{obs}^{median:m1-m12}}{3}$  τότε  $SoL_m^{obs} = null$ ,  $SoL_{obs}^{median:m1-m12}$  είναι ο διάμεσος από όλους του μήνες και τα έτη.
- αν  $S_{obs}^m > 2 \cdot SoL_{obs}^{median:m}$  τότε  $SoL_{obs}^m = null$
- αν  $SoL_{March} = null$ , τότε επιλέγεται κατά σειρά ο  $SoL_{February}$  ή  $SoL_{April}$

Προχωρώντας ένα βήμα παραπέρα, και εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι υπάρχει διαθέσιμος ο δείκτης SoL επιχειρήθηκε η πρόβλεψη του ΑΕΠ. Για την εκτίμηση του ΑΕΠ των στατιστικών μονάδων NUTS 3 εκτελέστηκε πρόβλεψη με γραμμική παλινδρόμηση με ετήσια δεδομένα ΑΕΠ (2014, 2015, 2016, 2017) και του ετήσιου δείκτη SoL. Οι συντελεστές παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του μηνιαίου ΑΕΠ ανά έτος και εδαφική στατιστική μονάδα NUTS 3. Αρχικά δοκιμάστηκε η προσαρμογή ενός μοντέλου με όλα τα δεδομένα ΑΕΠ και SoL (βλ. Διάγραμμα 8).



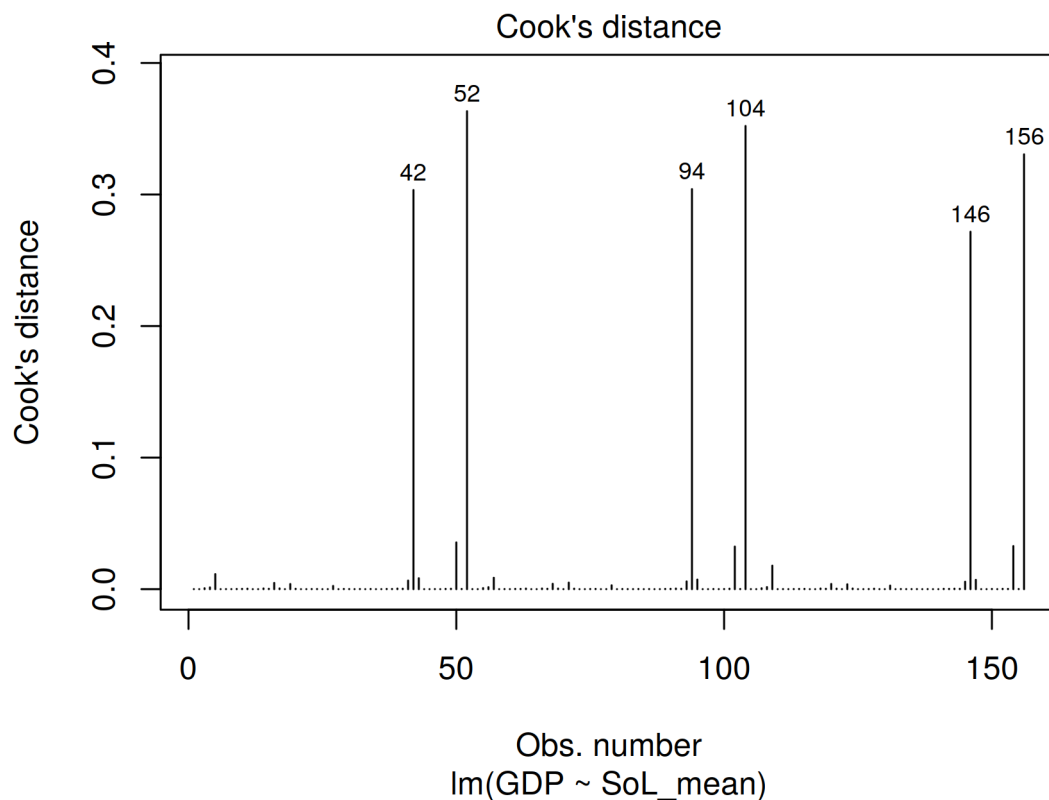
Διάγραμμα 8: Μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης για το AEΠ και τον δείκτη SoL (NUTS3, 2014-2017). (Πηγή: ιδία επεξεργασία).

Από την οπτικοποίηση στο γράφημα είναι προφανές ότι κάποια δεδομένα έχουν ακραίες τιμές. Από την προσαρμογή προέκυψε ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2 = 0,47$ .

Για να επιτευχθεί καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου και πιο αξιόλογες εκτιμήσεις εντοπίστηκαν και αφαιρέθηκαν από την ανάλυση οι ακραίες τιμές. Το μέτρο που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό των ακραίων τιμών είναι η απόσταση του Cook (Cook's distance). Η απόσταση του Cook είναι ένα μετρικό για τον καθορισμό της επίδρασης κάθε τιμής. Κατά τον υπολογισμό του μοντέλου και με παράλειψη της συγκεκριμένης τιμής καθορίζει πόσο θα μεταβληθούν οι τιμές των καταλοίπων για τις υπόλοιπες περιπτώσεις. Αν μια παρατήρηση αποτελεί σημαντικό σημείο επιρροής και την αφαιρέσουμε τότε θα υπάρχει μια σημαντική διαφορά μεταξύ των τιμών των εκτιμώμενων συντελεστών παλιν-

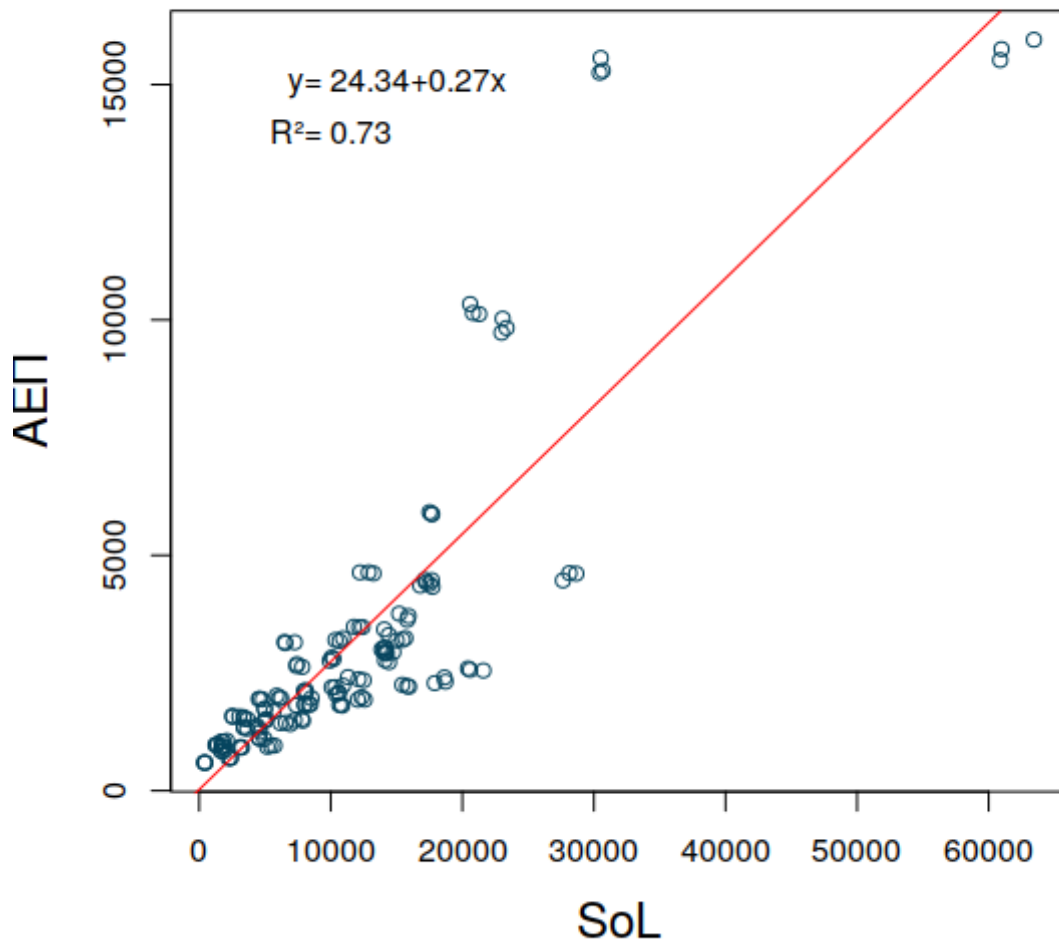
δρόμησης. Καθορίζει πόσο οι τιμές των υπολοίπων όλων των περιπτώσεων θα μεταβληθούν, αν η συγκεκριμένη τιμή δε ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς των συντελεστών του μοντέλου.

Στο Διάγραμμα 9 φαίνονται τα σημαντικά σημεία επιρροής από το σύνολο των παρατηρήσεων (αναγράφεται ο αύξων αριθμός της παρατήρησης).



Διάγραμμα 9: Η απόσταση Cook για το μοντέλο γραμμική παλινδρόμησης για το ΑΕΠ και τον δείκτη SoL. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Από την ανάλυση αφαιρέθηκαν οι ακραίες τιμές (Ανατολικής Αττικής και Κεντρικού Τομέα Αθηνών) και επαναλήφθηκε η προσαρμογή του μοντέλου γραμμικής παλινδρόμησης (βλ. Διάγραμμα 10). Το πλήθος των τελικών παρατηρήσεων είναι  $n = 135$ .



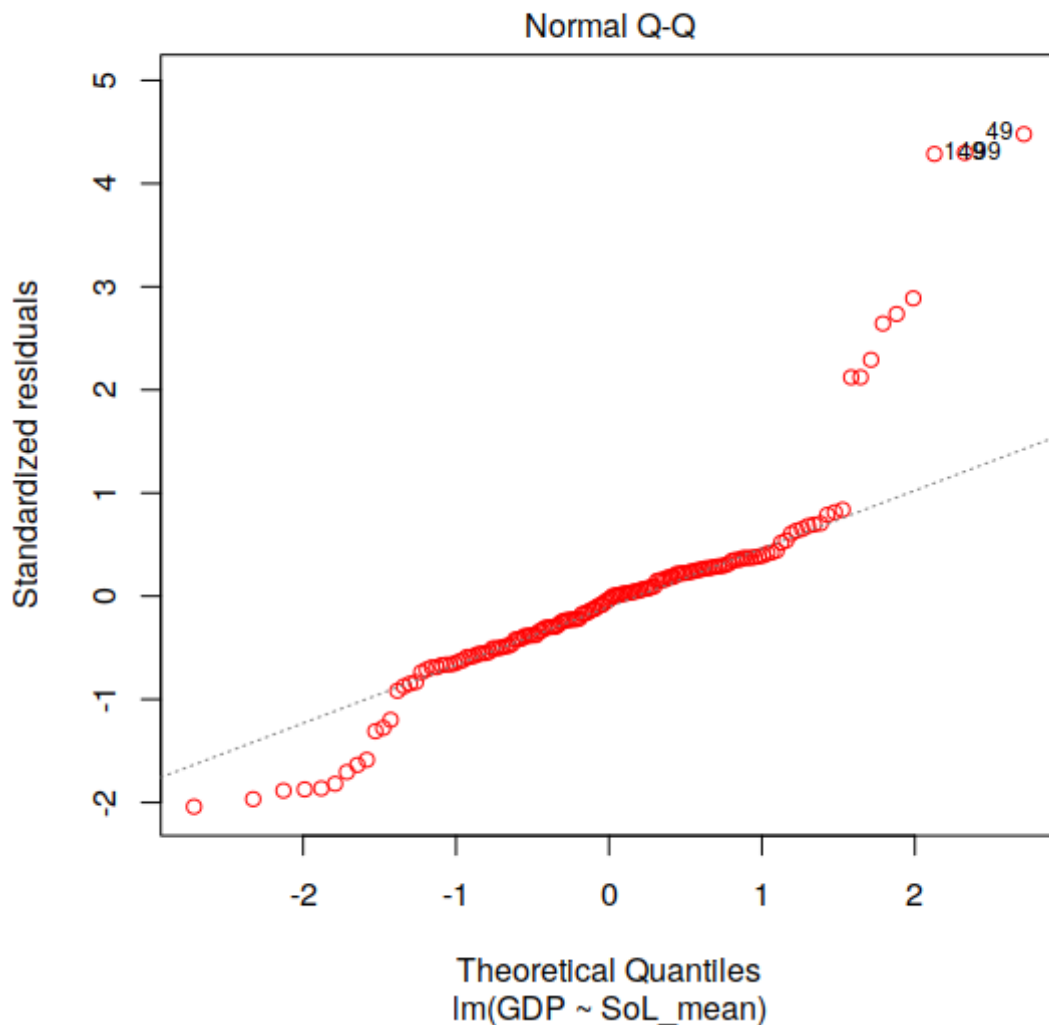
Διάγραμμα 10: Μοντέλο γραμμικής παλινδρόμησης κατόπιν αφαίρεσης ακραίων τιμών για το ΑΕΠ και τον δείκτη SoL (NUTS 3, 2014-2017). (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Κατά την επανάληψη προέκυψε αρκετά πιο ισχυρός συντελεστής προσδιορισμού ( $R^2 = 0,73$ ). Επιπλέον ο συντελεστής συσχέτισης Pearson μεταξύ των δύο μεταβλητών είναι  $R = 0,81$ .

Προκειμένου να ελέγξουμε την αξιοπιστία του γραμμικού μοντέλου έγινε ανάλυση καταλοίπων. Τα κατάλοιπα ουσιαστικά αποδίδουν το μέγεθος της διακύμανσης που δεν ερμηνεύεται από το μοντέλο. Μία από τις υποθέσεις της γραμμικής παλινδρόμησης είναι η κανονικότητα, ότι τα κατάλοιπα της παλινδρόμησης ακολουθούν κανονική κατανομή. Ένας γραφικός τρόπος για τον έλεγχο της κανονικότητας είναι τα διαγράμματα  $Q-Q$ . Το Διάγραμμα  $Q-Q$  ταξινομεί τα δεδομένα σε αύξουσα σειρά και μετά τα οπτικοποιεί έναντι των τεταρτημόριων μιας κανονικής κατανομής. Αν τα σημεία είναι κοντά στην γραμμή τότε

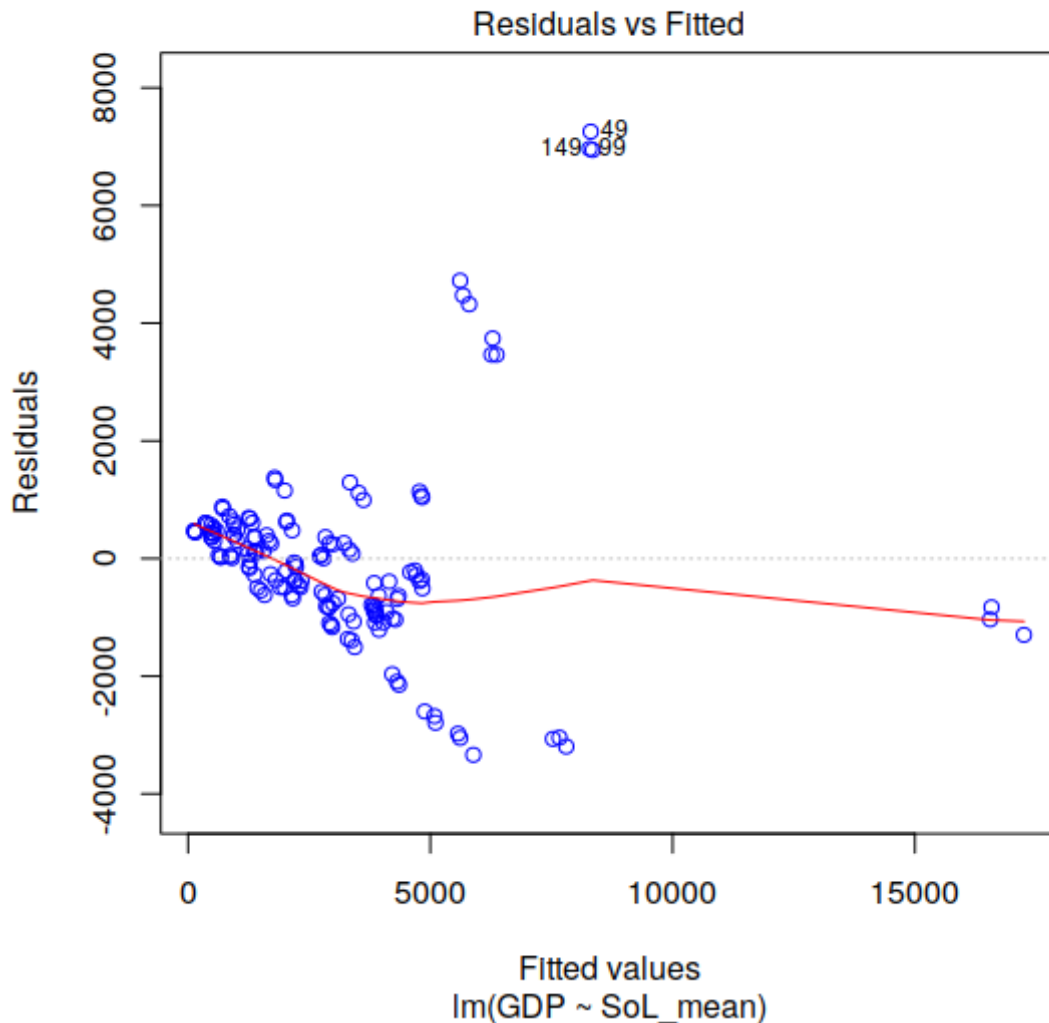
αυτό είναι μια ένδειξη ότι τα κατάλοιπα ακολουθούν κανονική κατανομή. Η ερμηνεία των γραφημάτων  $Q-Q$  σε περιπτώσεις με μικρά δείγματα δεν είναι πάντα ασφαλής.

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 11 τα κατάλοιπα δεν ακολουθούν κανονική κατανομή γιατί αρκετά από τα σημεία αποκλίνουν από την ευθεία γραμμή. Ενώ εξακολουθούν να υπάρχουν και ορισμένες ακραίες τιμές.



Διάγραμμα 11: Ανάλυση καταλοίπων για την γραμμική παλινδρόμηση ΑΕΠ και δείκτη SoL: γράφημα Q-Q. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Ένας οπτικός έλεγχος που μπορεί να γίνει για τον εντοπισμό μη γραμμικών προτύπων είναι με το Διάγραμμα *Residuals vs Fitted*. Για να εντοπιστούν πιθανά προβλήματα σε αυτό τον τύπο διαγράμματος ελέγχεται αν η σχέση των δύο μεταβλητών είναι γραμμική. Από το Διάγραμμα 12 παρατηρείται η μη γραμμικότητα του μοντέλου. Ενδεχομένως να απαιτείται η επιλογή άλλου μοντέλου.

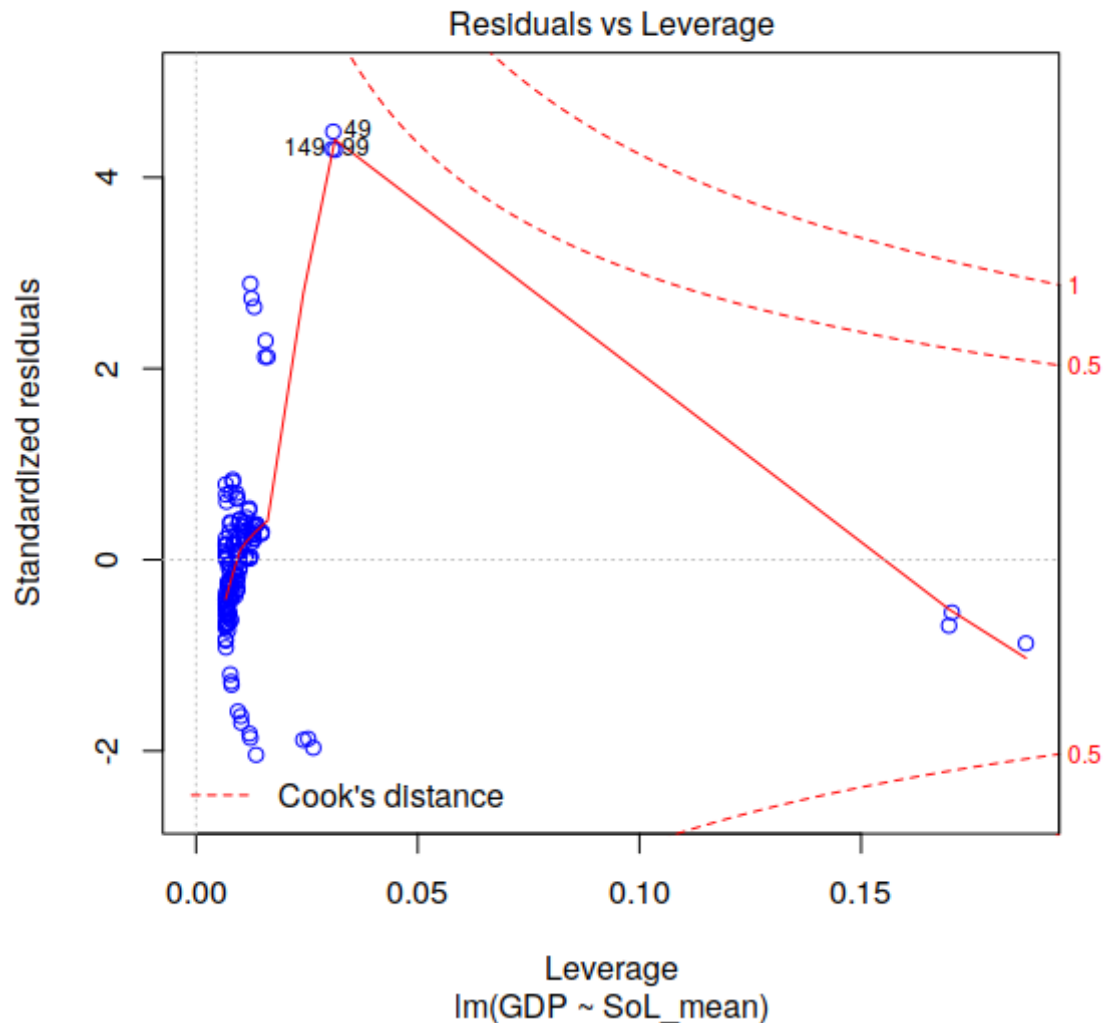


Διάγραμμα 12: Ανάλυση καταλοίπων για την γραμμική παλινδρόμηση ΑΕΠ και δείκτη SoL: γράφημα Residuals vs Fitted. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Το επόμενο Διάγραμμα αφορά τους δείκτες επιρροής  $h_i$  (leverages) έναντι των τυποποιημένων κατάλοιπων (*Residuals vs Leverage plot*).

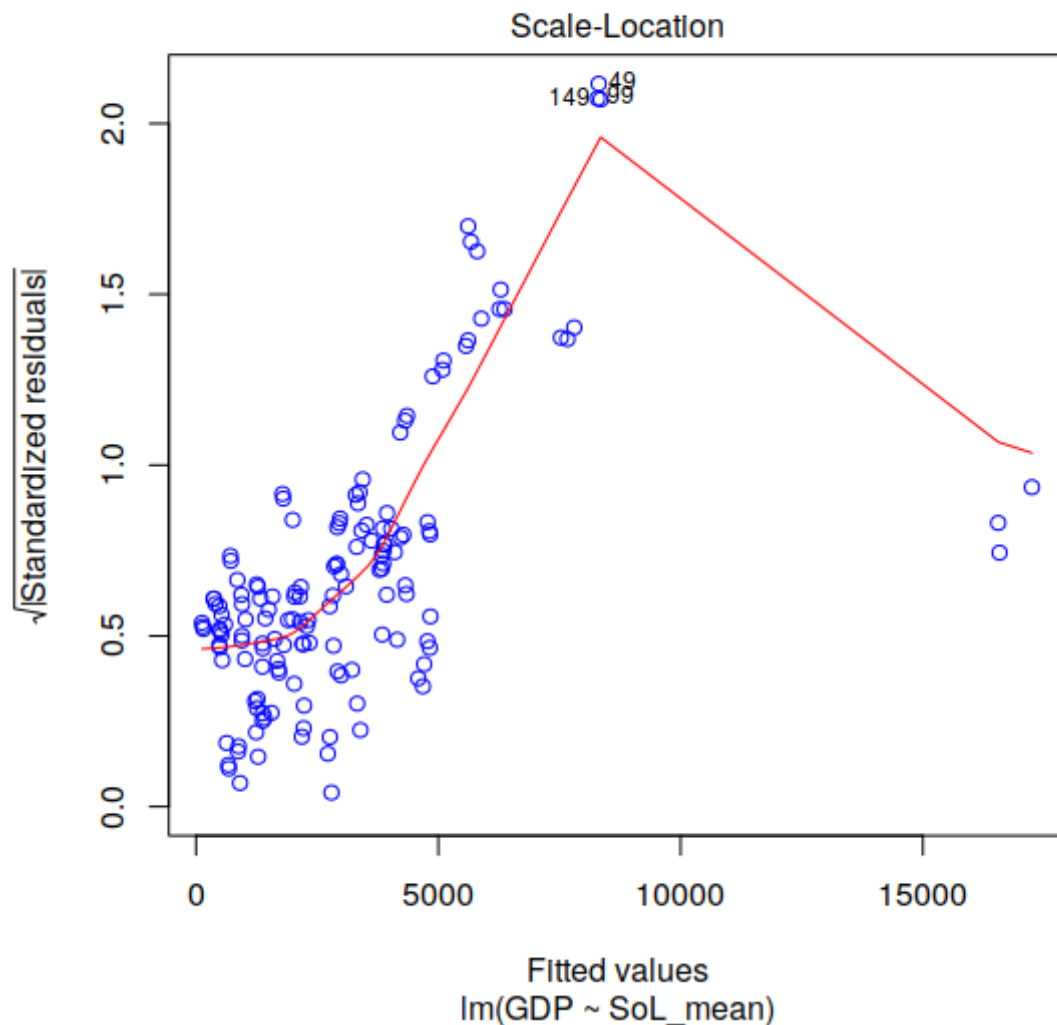
Τα υπολείμματα, όταν διαιρεθούν με την τυπική απόκλισή τους, μετατρέπονται σε τυποποιημένα. Τα τυποποιημένα υπολείμματα έχουν μέσο όρο 0 και διακύμανση 1. Όταν οι τιμές τους είναι  $> |2|$  και κυρίως  $> |3|$  είναι σημαντική ένδειξη ότι οι εξεταζόμενες τιμές έχουν σημαντική απόκλιση από την ευθεία προσαρμογής. Σε αυτό τον γράφημα για να θεωρηθεί μια προσαρμογή μοντέλου ικανοποιητική αναμένεται η κόκκινη γραμμή να είναι κοντά στην διακεκομμένη γκρι. Επίσης τα σημεία δεν πρέπει να υπερβαίνουν την απόσταση Cook 0,5. Στο Διάγραμμα ισχύει μόνο η μία συνθήκη (τιμές σημείων  $< 0.5$  απόσταση Cook).





Διάγραμμα 13: Ανάλυση καταλοίπων για την γραμμική παλινδρόμηση ΑΕΠ και δείκτη SoL: γράφημα Residuals vs Leverage. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Επιπλέον, με το Διάγραμμα *Scale-Location* ελέγχεται αν η διακύμανση των καταλοίπων είναι σταθερή δηλαδή αν τα κατάλοιπα είναι ομοιόμορφα κατανομημένα εκατέρωθεν της γραμμής παλινδρόμησης. Σε αυτό το Διάγραμμα αναμένεται η κόκκινη γραμμή να είναι σχεδόν ευθεία (ισχύει η υπόθεση της ομοσκεδαστικότητας) και τα σημεία να είναι διάσπαρτα τυχαία εκατέρωθεν αυτής και να μην μεταβάλλεται η διασπορά σε συστάδες. Όπως φαίνεται από την οπτικοποίηση αυτού του διαγράμματος δεν ισχύουν οι παραπάνω συνθήκες.



Διάγραμμα 14: Ανάλυση καταλοίπων: γράφημα Scale-Location

Από τα παραπάνω γραφήματα διαπιστώνουμε, παρά τον υψηλό συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2 = 0,73$ ) μεταξύ του ΑΕΠ και του δείκτη SoL η γραμμικότητα της σχέσης των δύο μεταβλητών δεν πληρεί ικανοποιητικά όλα τα κριτήρια.

### 3.3.5 ΧΩΡΙΚΑ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ

Ένας από τους στόχους της διατριβής είναι η ανάλυση των προτύπων μετακίνησης στην πόλη και η μελέτη της διακύμανσης της αστικής δραστηριότητας σε χωροχρονικό επίπεδο. Η εν λόγω ανάλυση περιορίζεται χρονικά στα έτη 2019 & 2020 και χωρικά στους Καλλικρατικούς δήμους της Αττικής. Το 2020 επιλέχθηκε για να εξεταστεί η επίδραση του

lockdown της COVID-19 στην κανονικότητα της αστικής δραστηριότητας και στα πρότυπα κατανομής και μετακίνησης του πληθυσμού. Η έρευνα βασίζεται σε δύο μεθόδους διερεύνησης. Στην πρώτη μέθοδο, επιλέγονται δύο χρονικά σημεία αναφοράς στο έτος με διαφορετικά χαρακτηριστικά αστικής δραστηριότητας, ο Μάρτιος και ο Αύγουστος και υπολογίζεται η διαφορά ( $\Delta 1$ ) του μέσου όρου της ακτινοβολίας νυχτερινών φώτων των δύο μηνών για κάθε δήμο ως εξής:

$$\Delta 1_{i,j} = DNB_{March_{i,j}} - DNB_{August_{i,j}} \quad (24)$$

όπου  $\Delta 1_i$  είναι η διαφορά της μέσης ακτινοβολίας των μηνιαίων σύνθετων των νυχτερινών φώτων snpp-VIIRS “Black Marble” VNP46A2 στην χωρική ενότητα  $i$  τον Μάρτιο ( $DNB_{March}$ ) από την αντίστοιχη μέση ακτινοβολία τον Αύγουστο ( $DNB_{August}$ ) για κάθε έτος  $j = 2019, 2020$ . Στις χωρικές ενότητες των υπολογισμών περιλαμβάνονται πέρα από τους καλλικρατικούς δήμους ( $i$ ) και το σύνολο της περιφέρειας  $r$ , όπου  $i \subset r$ .

Επιπλέον υπολογίζεται ο *συντελεστής χωροθέτησης* (Location Quotient):

$$LQ1_{i,j} = \frac{\Delta 1_{i,j}}{\Delta 1_{r,j}} \quad (25)$$

όπου  $LQ1_{i,j}$  είναι ο *συντελεστής χωροθέτησης* ( $LQ$ ) το έτος  $j$  για τον δήμο  $i$ , και  $\Delta 1_{i,j}$  και  $\Delta 1_{r,j}$  ο δείκτης  $\Delta 1$  για τον δήμο  $i$  και την περιφέρεια  $r$  αντίστοιχα.

Στην δεύτερη μέθοδο, ερευνάται η διαφοροποίηση της αστικής δραστηριότητας κατά την διάρκεια της εβδομάδας, ανάμεσα σε καθημερινές και σαββατοκύριακα για κάθε μήνα των ετών 2019, 2020.

$$\Delta 2_{i,m,j} = DNB_{weekdays_{i,m,j}} - DNB_{weekend_{i,m,j}} \quad (26)$$

όπου,  $\Delta 2_{i,m,j}$  είναι η διαφορά της μέσης ακτινοβολίας των νυχτερινών φώτων snpp-VIIRS Black Marble VNP46A2 για τις σύνθετες εικόνες (composite) των καθημερινών ( $weekdays = 1, 2, \dots, 5$ , όπου  $1 = \text{Δευτέρα}$ ) από την αντίστοιχη μέση ακτινοβολία των σαββατοκύριακων ( $weekend = 6, 7$ ) για τον δήμο  $i$  (ή όλη την περιφέρεια  $r$ ), τον μήνα  $m = 1, 2, 3 \dots 12$  του έτους  $j = 2019, 2020$ .

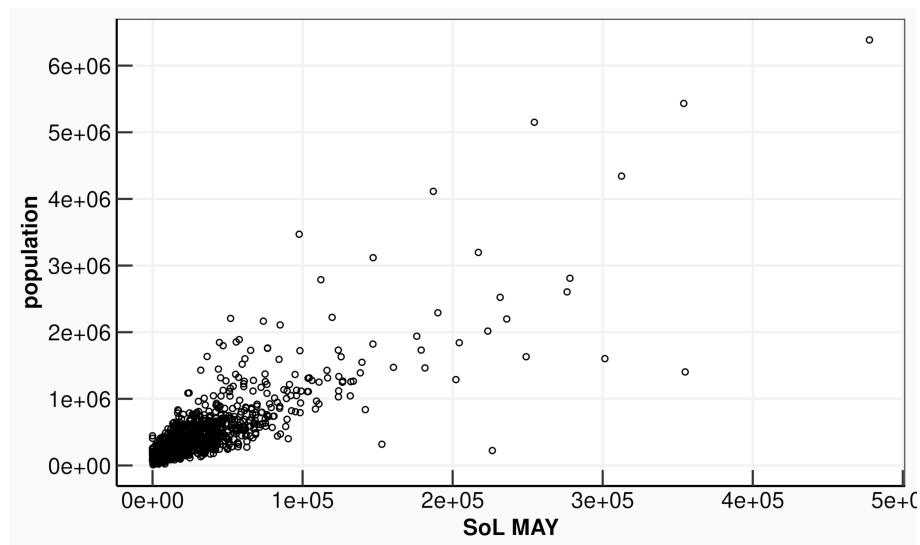
Αντίστοιχα υπολογίζεται ο *συντελεστής χωροθέτησης* ( $LQ2$ )

$$LQ2_{i,m,j} = \frac{\Delta 2_{i,j}}{\Delta 2_{r,j}} \quad (27)$$

όπου  $LQ_{2i,m,j}$  είναι ο συντελεστής χωροθέτησης ( $LQ$ ) τον μήνα  $m$ , του έτους  $j$  για τον δήμο  $i$ , και  $\Delta 2_{i,m,j}$  και  $\Delta 2_{r,j}$  ο δείκτης  $\Delta 2$  για τον δήμο  $i$  και την περιφέρεια  $r$  αντίστοιχα.

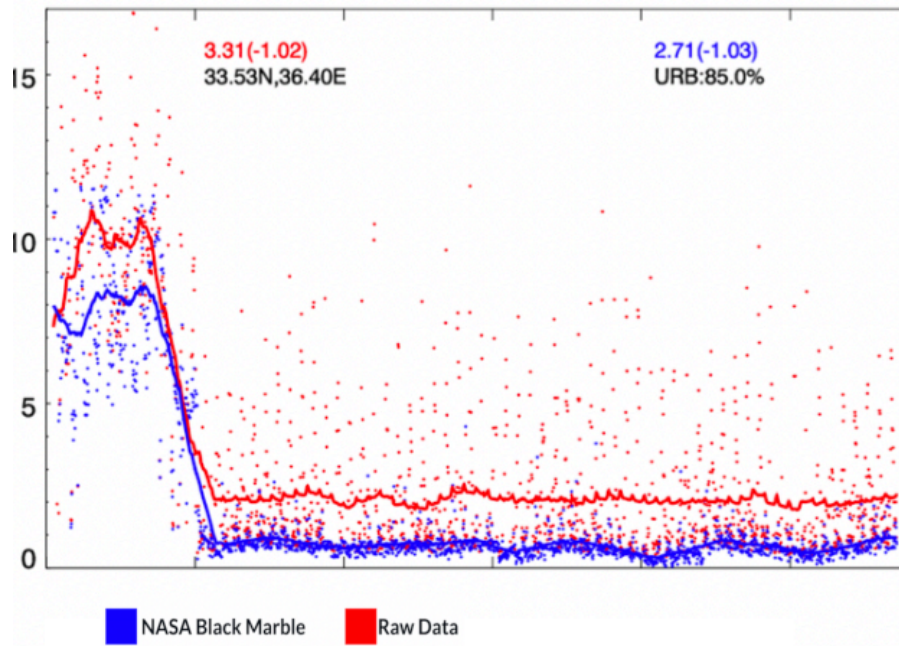
### 3.3.6 ΕΚΤΑΚΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΝΥΧΤΕΡΙΝΑ ΦΩΤΑ

Η συσχέτιση των νυχτερινών φώτων με δείκτες αστικής και οικονομικής δραστηριότητας (π.χ. την απασχόληση, το ΑΕΠ, τον πληθυσμό) έχει αναφερθεί στις υποθέσεις εργασίας. Χαρακτηριστικό είναι το Διάγραμμα διασποράς για το SoL και τον πληθυσμό των στατιστικών μονάδων NUTS 3 της Ευρώπης.



Διάγραμμα 15: Διαγράμματα διασποράς του SoL και του πληθυσμού των στατιστικών μονάδων NUTS 3 της Ευρώπης. (Πηγή: Stathakis et al., 2021).

Μέσω των δεδομένων snrrp-VIIRS, είναι δυνατόν να καταγραφούν συμβάντα όπως μεταβολές στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μιας περιοχής από ένα καταστροφικό συμβάν (π.χ. πόλεμος ή σεισμός, βλ. Διάγραμμα 16) καθώς και πληθυσμιακές ροές που οφείλονται σε θρησκευτικά γεγονότα ή πολεμικές συρράξεις.



Διάγραμμα 16: Η διακύμανση του ηλεκτροφωτισμού στην Αλέππο της Συρίας την περίοδο 2012-2017 όπως καταγράφεται από τα αδρά (κόκκινο) και Black Marble (μπλε) δεδομένα VIIRS. Είναι ορατή η μείωση του ηλεκτροφωτισμού μετά τις πολεμικές συρράξεις. (Πηγή: Stokes et al., 2019).

Οι επιπτώσεις της πανδημίας της COVID-19 στην οικονομική και αστική δραστηριότητα δεν μπορούν να καταγραφούν άμεσα με τις τυπικές μεθόδους απογραφής. Ωστόσο τα νυχτερινά φώτα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν υποκατάστατη (proxy) μεταβλητή που αποδίδει την μεταβολή της αστικής δραστηριότητας. Αναμένεται η μείωση της οικονομικής δραστηριότητας που προκλήθηκε από τον COVID-19 να είναι ορατή μέσω των νυχτερινών φώτων. Επίσης, η μείωση αυτή αναμένεται να μην είναι ομοιογενής χωρικά αλλά να εξαρτάται από το πληθυσμιακό μέγεθος, το οικονομικό του υπόβαθρο και την εξειδίκευση του κάθε δήμου.

Στην τρέχουσα ενότητα στόχος είναι να μελετηθεί η επίπτωση του γενικού απαγορευτικού (lockdown) που επιβλήθηκε λόγω της πανδημίας του κορωνοϊού (COVID-19) στην αστική δραστηριότητα σε λεπτομερή χωρική ανάλυση. Η ανάλυση γίνεται στην Ελλάδα σε επίπεδο Καλλικρατικού δήμου (326 διοικητικές ενότητες). Στην Ελλάδα επιβλήθηκε το lockdown στις 23 Μαρτίου και τερματίστηκε στις 01 Ιουνίου 2020. Κατά την διάρκεια του lockdown επιβλήθηκαν μέτρα για την απαγόρευση και τον έλεγχο της κυκλοφορίας, την διακοπή του λιανικού εμπορίου και το κλείσιμο των σχολείων. Για την περίοδο Μάιος-Ιούνιος τα κρούσματα και οι θάνατοι λόγω COVID-19 παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Τα δεδομένα VIIRS DNB Cloud-Free monthly composites για την περίοδο 2017-2019 συγχωνεύθηκαν με τον μέσο όρο ανά μήνα για να σχηματιστεί μια «κανονικότητα» για

	Μάρτιος	Απρίλιος	Μάιος	Ιούνιος
Κρούσματα	1310	1277	326	492
Θάνατοι	49	91	35	17

Πίνακας 10: Κρούσματα και θάνατοι από τον COVID-19 ανά μήνα του 2020. (Πηγή: Stathakis et al., 2021).

κάθε δήμο. Για κάθε μήνα και ανά δήμο υπολογίστηκε ο δείκτης "Αθροίσματος του φωτός" (SoL) (βλ. τύπος 4, σελ. 89). Στο επόμενο βήμα υπολογίστηκε ο δείκτης απόκλισης (%) από την κανονικότητα (2017-2019) (normality divergence) ( $\Delta$ ) ανά μήνα ως εξής:

$$\Delta_i = \frac{SoL_i^{2020} - SoL_i^{(2017-2019)}}{SoL_i^{(2017-2019)}} \cdot 100 \quad (28)$$

όπου,  $\Delta_i$  είναι η μηνιαία απόκλιση από την κανονικότητα για κάθε δήμο,  $SoL_i^{2020}$  και  $SoL_i^{(2017-2019)}$  είναι ο δείκτης SoL για κάθε μήνα για το έτος 2020 και τον μέσο μήνα της περιόδου 2017-2019 αντίστοιχα. Από την ανάλυση εξαιρέθηκαν οι μήνες Ιανουάριος και Φεβρουάριος καθότι την περίοδο αυτήν παρατηρείται αυξημένη χιονοκάλυψη που επηρεάζει τις τιμές της ακτινοβολίας (Coesfeld et al., 2018) και επηρεάζει τον δείκτη απόκλισης. Επιπλέον, εξαιρέθηκαν από την ανάλυση ασταθείς δήμοι (29 συνολικά) οι οποίοι είχαν  $SoL < 10$  τον μέσο μήνα Φεβρουάριο της περιόδου 2017-2019. Πρόκειται για μικρούς ορεινούς και νησιωτικούς δήμους.

### 3.3.7 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ISS ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ

Η χρήση των εικόνων ISS έγινε εμπειρικά και συγκριτικά με στόχο να μελετηθεί και πρακτικά η διαφορά αλλά και η επάρκεια των υπολοίπων δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην έρευνα (DMSP/OLS, snpp-VIIRS). Αξιολογείται η διαφορά στο φασματικό εύρος με τα δεδομένα snpp-VIIRS, συγκρίνεται η χωρική ανάλυση των επιμέρους προϊόντων και αναδεικνύεται με οπτικό τρόπο ο περιορισμός των δεδομένων DMSP/OLS και snpp-VIIRS να αποδώσουν τις λεπτομέρειες και τις παραλλαγές του αστικού τοπίου όσον αφορά τις χρήσεις γης. Ειδικά για τον τεχνικό περιορισμό του κορεσμού και της υπερλάμψης των δεδομένων DMSP/OLS και προκειμένου να αναδειχθεί το μέγεθος του προβλήματος γίνεται οπτικοποίηση σε συνδυασμό με τα δεδομένα ISS.

## 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ DMSP/OLS

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου για την βελτίωση των δεδομένων DMSP/OLS διαπιστώνεται ότι τα δεδομένα SAR προσφέρουν καλύτερη περιγραφή της παραλλαγής του αστικού πυρήνα όπου τυπικά η βλάστηση είναι περιορισμένη (ο δείκτης VANUI είναι ανεπαρκής σε αυτή την περίπτωση) και τα νυχτερινά φώτα πάσχουν από κορεσμό και δεν αποδίδουν την αστική ένταση (βλ. Διάγραμμα 17i).

Το αδύναμο σημείο του δείκτη VANUI είναι ότι η απουσία βλάστησης ( $NDVI \rightarrow 0$ ) θεωρείται αστικός πυρήνας γεγονός το οποίο στην πραγματικότητα δεν ισχύει απόλυτα αφού έλλειψη βλάστησης παρατηρείται και σε γυμνά εδάφη (π.χ. σε βραχώδεις εκτάσεις ή ξηροθερμικές περιοχές).

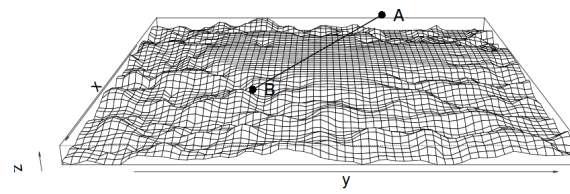
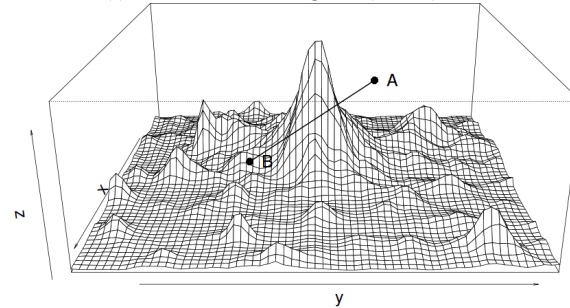
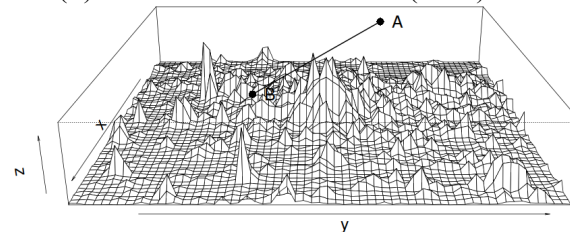
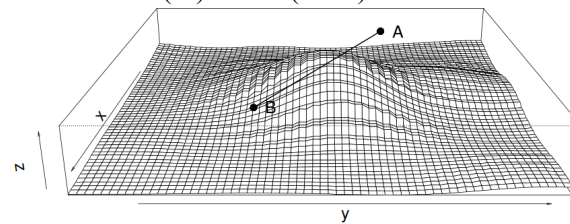
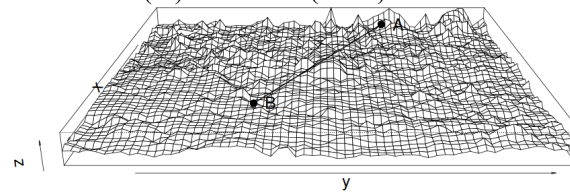
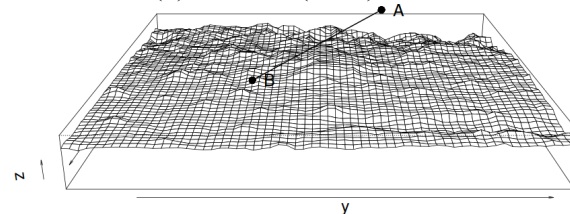
Συμπληρωματικά στον δείκτη VANUI έρχεται η επέκταση με την προσθήκη των δεδομένων SAR τα οποία συμβάλλουν πιο αξιόπιστα στο διαχωρισμό μεταξύ αστικού περιβάλλοντος και άγονων/γυμνών εδαφών. Τα δεδομένα οπισθοσκέδασης συσχετίζονται με το αστικό περιβάλλον, και έχουν υψηλές τιμές σε αστικό περιβάλλον χωρίς βλάστηση. Αντίθετα σε εξω-αστικό περιβάλλον με ελλιπή βλάστηση και γυμνό έδαφος οι τιμές της οπισθοσκέδασης είναι χαμηλές (εξαίρεση αποτελούν τα βραχώδη εδάφη που αυξάνουν την οπισθοσκέδαση). Κατά συνέπεια, ο πολλαπλασιασμός του δείκτη VANUI με τις τιμές των δεδομένων SeaWinds ( $S[0, 1]$ ) είναι ένας επιπλέον παράγοντας βελτιστοποίησης στην απόδοση των αστικών περιοχών.

Στον πίνακα 11 παρατίθενται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου στις σχετικές περιοχές ενδιαφέροντος. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η προτεινόμενη μέθοδος βελτιώνει, σημαντικά στις περισσότερες περιπτώσεις, την συσχέτιση με τα δεδομένα αναφοράς (snpp-VIIRS και τα διαβαθμονομημένα δεδομένα DMSP/OLS). Η βελτίωση είναι πιο εμφανής σε περιπτώσεις όπου η βλάστηση είναι πιο περιορισμένη. Εκεί δηλαδή όπου η βελτίωση με βάση την βλάστηση είναι ανεπαρκής και αποτυγχάνει, η μέθοδος έρχεται να καλύψει αυτή την αδυναμία. Τα δεδομένα QuickSCAT επηρεάζονται σε περιορισμένο βαθμό από αντικείμενα υψηλής οπισθοσκέδασης από φυσικά αντικείμενα στον περιαστικό χώρο εξαιτίας του μήκους κύματος (βλ. Εικόνα 12iv).

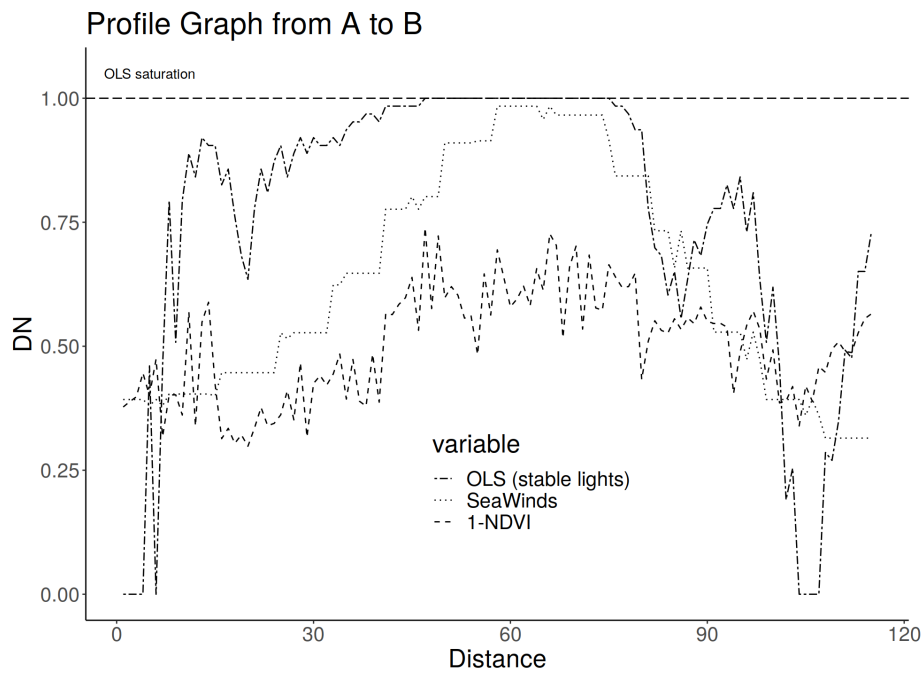
VIIRS						
	1-NDVI	SeaWinds	DSMP/OLS	VANUI	TVANUI	SANUI
Αμμάν	-0.02	0.53	0.57	0.59	41	68
Άγκυρα	0.27	0.64	0.64	0.67	0.68	0.73
Αθήνα	0.64	0.63	0.61	0.71	0.7	0.81
Βρυξέλλες	0.75	0.45	0.47	0.77	0.77	0.78
Κάιρο	-0.04	0.41	0.47	0.53	0.52	0.61
Λονδίνο	0.65	0.65	0.53	0.74	0.75	0.8
Μιλάνο	0.41	0.6	0.57	0.7	0.66	0.76
Μόσχα	0.19	0.36	0.36	0.4	0.43	0.46
Παρίσι	0.5	0.78	0.67	0.8	0.86	0.87
Φραγκφούρτη	0.46	0.41	0.49	0.61	0.61	0.65
OLS διαβαθμονομημένα δεδομένα						
	1-NDVI	SeaWinds	DSMP/OLS	VANUI	TVANUI	SANUI
Αμμάν	-0.11	0.58	0.56	0.57	0.29	0.7
Άγκυρα	0.24	0.7	0.69	0.71	0.73	0.79
Αθήνα	0.6	0.71	0.66	0.73	0.71	0.86
Βρυξέλλες	0.68	0.59	0.62	0.79	0.73	0.82
Κάιρο	-0.1	0.57	0.56	0.6	0.57	0.76
Λονδίνο	0.54	0.76	0.7	0.81	0.84	0.85
Μιλάνο	0.28	0.76	0.62	0.68	0.68	0.84
Μόσχα	0.3	0.75	0.65	0.7	0.76	0.87
Παρίσι	0.43	0.86	0.74	0.82	0.86	0.9
Φραγκφούρτη	0.43	0.65	0.83	0.82	0.84	0.84

Πίνακας 11: Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson της μέθοδου βελτίωσης των δεδομένων DMSP/OLS με τα δεδομένα snpp-VIIRS και τα DMSP/OLS διαβαθμονομημένης ακτινοβολίας. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019a).

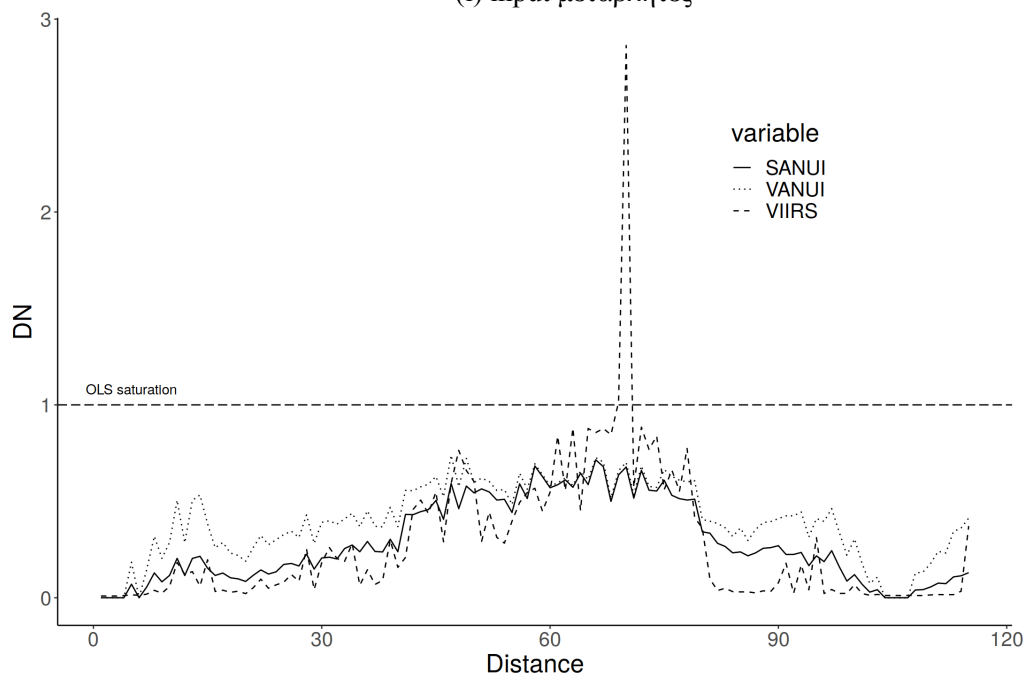


(i) OLS-Stable Lights (2013)  $z=5$ (ii) OLS Radiance Calibrated (2010)  $z=5$ (iii) VIIRS(2014)  $z=15$ (iv) SeaWinds(2019)  $z=25$ (v) 1-NDVI (2013)  $z=15$ (vi) Land Surface Temperature-LST (2013)  $z=15$ 

Εικόνα 12: Το Μιλάνο σε τρισδιάστατη απεικόνιση στις διαφορετικές πηγές δεδομένων νυχτερινών φωτών, ραντάρ, δείκτη βλάστησης και θερμοκρασίας εδάφους. Στο (i) ο κορεσμός των διαβαθνομημένων δεδομένων DMSP/OLS είναι εμφανής. Η οπτικοποίηση τους έχει υποστεί υπερβολή κατά τον άξονα  $z$  ( $z$  factor). Η έκτασης της περιοχής μελέτης είναι  $126 \times 113$  km. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019a).



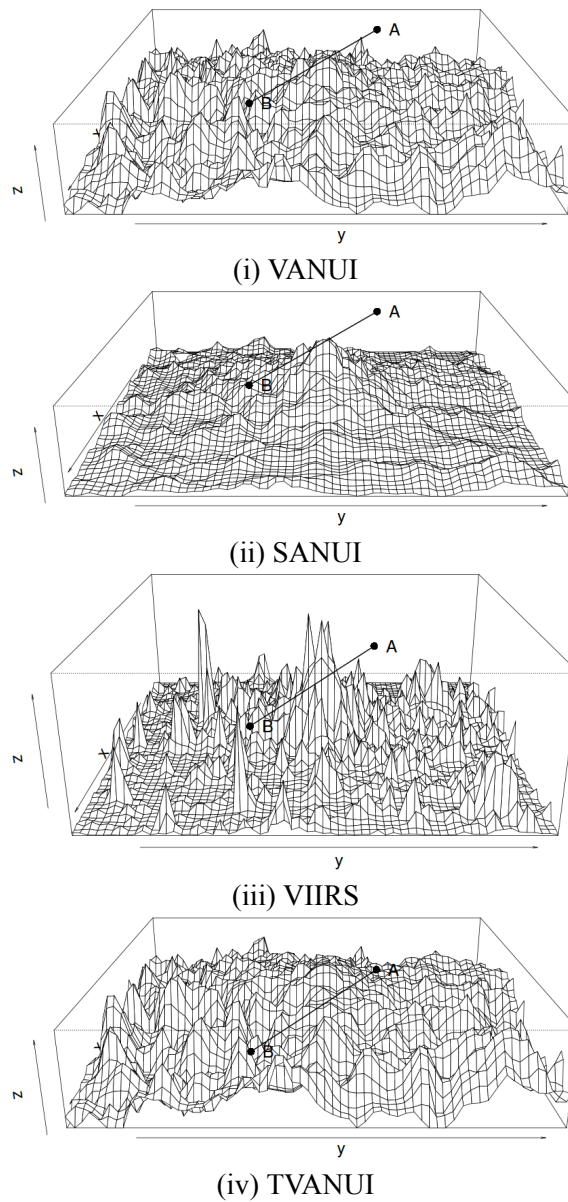
(i) input μεταβλητές



(ii) αποτέλεσμα και μεταβλητές ελέγχου

Διάγραμμα 17: Εγκάρσια τομή (Cross-section) AB (όπως ορίζεται στην Εικόνα 9 ) για το Μιλάνο (i) για τις input μεταβλητές και (ii) αποτέλεσμα και μεταβλητές ελέγχου. Οι τιμές DN's όλων έχουν κανονικοποιηθεί στο διάστημα  $[0,1]$  εκτός του VIIRS του οποίου έχουν διαιρεθεί με 63. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019a).

Στην τομή που απεικονίζεται στο Διάγραμμα 17ii ο δείκτης SANUI προσεγγίζει τα δεδομένα snrrp-VIIRS ιδιαίτερα στα όρια της πόλης. Επιπλέον, τα διορθωμένα δεδομένα απεικονίζονται συγκριτικά με τα δεδομένα αναφοράς και τους υφιστάμενους δείκτες στην Εικόνα 13. Όπως προκύπτει από την διόρθωση των δεδομένων με την προτεινόμενη φόρμουλα SANUI, αυτά έχουν λιγότερο θόρυβο συγκριτικά με άλλες περιπτώσεις (π.χ. δεδομένα snrrp-VIIRS, βλ. Εικόνα 13ii). Στα δεδομένα snrrp-VIIRS καταγράφονται υψηλές τιμές ακτινοβολίας (π.χ. από αεροδρόμια, γήπεδα, εμπορικά κέντρα) που αποδίδονται με χαρακτηριστικές εξοχές στην τρισδιάστατη απεικόνιση. Από την άλλη, τα διορθωμένα δεδομένα από τον δείκτη SANUI, ακολουθούν μια πιο ομαλή κατανομή που προσομοιάζει στο θεωρητικό σχήμα της πόλης με έντονη δραστηριότητα στο κέντρο η οποία φθίνει προς την περιφέρεια.



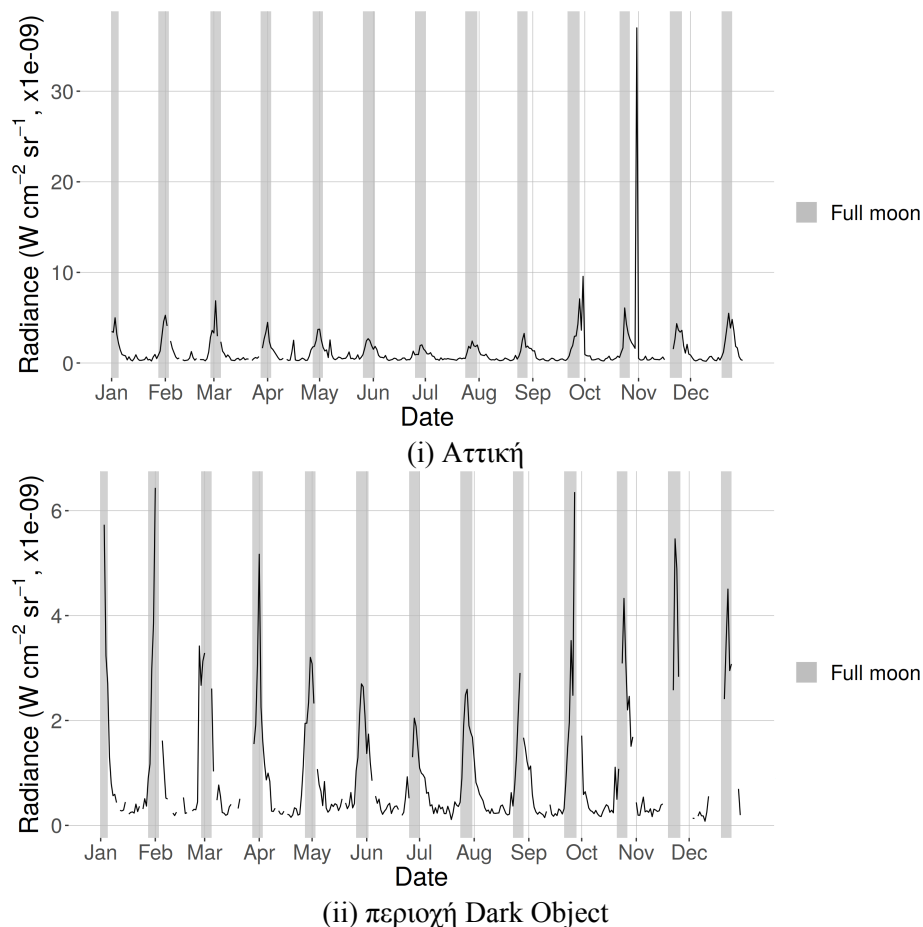
Εικόνα 13: Τα αποτελέσματα της διόρθωσης των δεδομένων DMSP/OLS και των δεδομένων αναφοράς σε τρισδιάστατη απεικόνιση (έχει γίνει καθ' ύψος υπερβολή των τιμών DN, για λόγους οπτικής βελτίωσης). (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019a).

## 4.2 ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ VIIRS

### 4.2.1 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΤΗΣ ΣΕΛΗΝΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Τα αποτελέσματα για την διόρθωση των δεδομένων snpp-VIIRS από την επίδραση της σεληνιακής ακτινοβολίας με την μέθοδο BRDF και Dark Object Substraction παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα. Στα διαγράμματα φαίνεται ο μέσος όρος και ο διάμεσος τόσο για τα πρωτογενή όσο και για τα διορθωμένα δεδομένα. Οι σκιασμένες κάθετες επιφάνειες ορίζουν τα διαστήματα πανσελήνου (ή σχεδόν πανσέληνου) που επηρεάζουν σημαντικά τα καταγεγραμμένα δεδομένα από τον αισθητήρα. Ο διάμεσος επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό από τις κενές (missing values) και τις ακραίες τιμές.

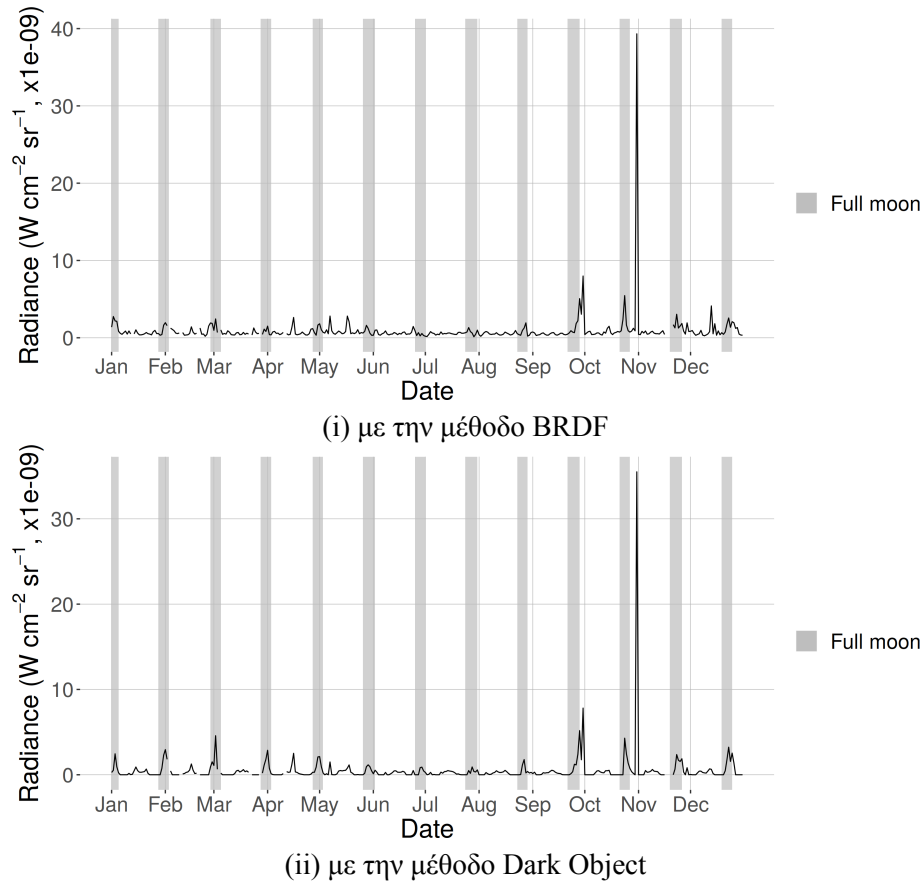
Στο Διάγραμμα 18 αποδίδεται ο διάμεσος των πρωτογενών δεδομένων για την Αττική και την περιοχή Dark Object. Εντοπίζεται η περιοδικότητα της επίδρασης της σεληνιακής ακτινοβολίας κατά την πανσέληνο.



Διάγραμμα 18: Ο διάμεσος της ακτινοβολίας νυκτερινών φώτων για την Αττική και την περιοχή Dark object πριν την διόρθωση Dark object (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019b).

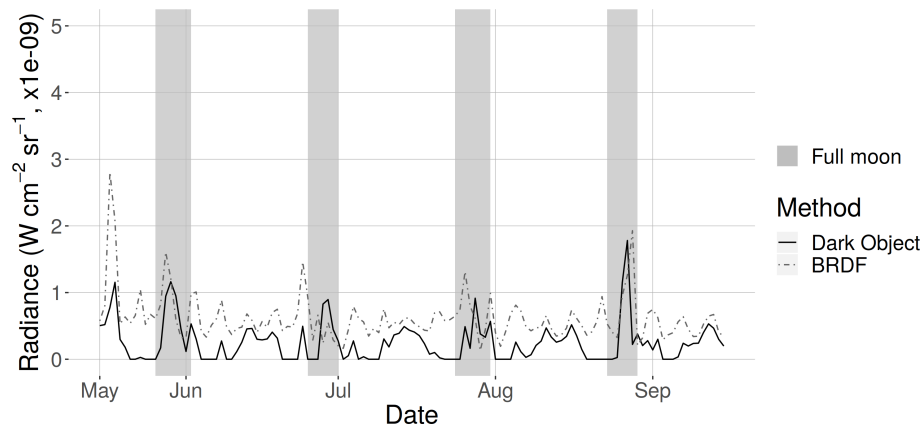
Από το Διάγραμμα 19 αποδεικνύεται ότι και οι δύο μέθοδοι είναι αποτελεσματικές

για την διόρθωση της σεληνιακής ακτινοβολίας και όσο πιο σταθερή είναι η καμπύλη του διορθωμένου διαμέσου τόσο πιο επαρκής θεωρείται η διόρθωση. Στο Διάγραμμα 21i παρουσιάζεται συγκριτικά ο διάμεσος κατόπιν της διόρθωσης με τις μεθόδους BRDF και Dark Object Subtraction.

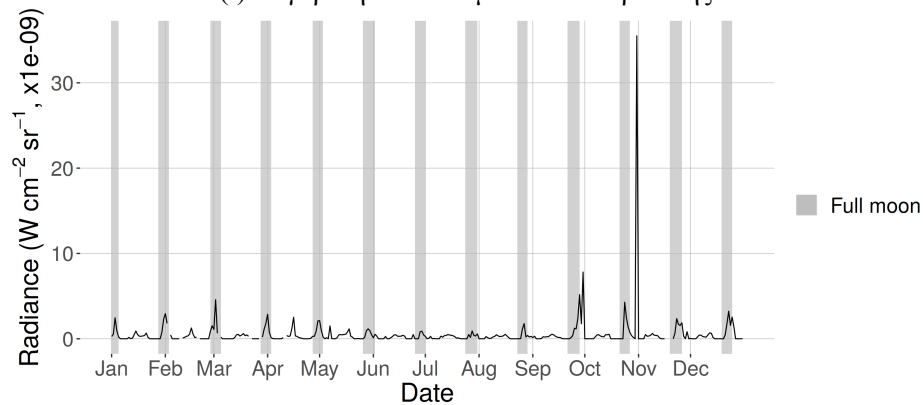


Διάγραμμα 19: Ο διάμεσος της ακτινοβολίας νυκτερινών φωτών για την Αττική μετά την διόρθωση Dark object. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019b).

Το Διάγραμμα 20i εστιάζει στην διόρθωση το καλοκαίρι του 2018. Είναι εμφανές ότι υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στις διορθώσεις. Ένας συνδυασμός των δύο μεθόδων θα μπορούσε να έχει καλύτερα αποτελέσματα.

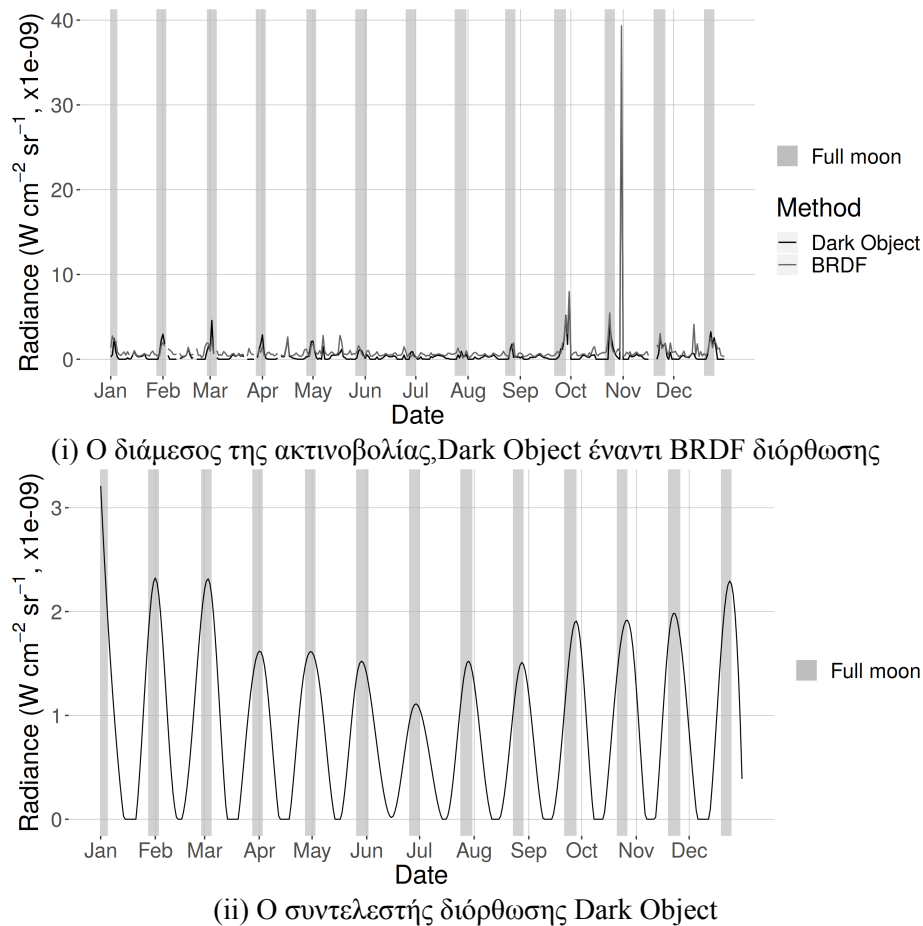


(i) Σύγκριση των δύο μεθόδων διόρθωσης



(ii) Ο διορθωμένος διάμεσος για την Αττική

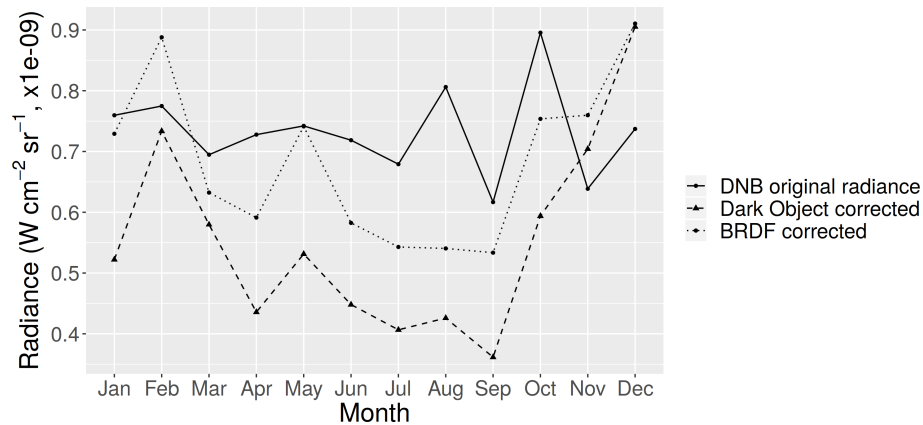
Διάγραμμα 20: Σύγκριση του διάμεσου των διορθωμένων δεδομένων της Αττικής με τις δύο μεθόδους διόρθωσης (εστίαση)(i) και διάμεσος της διορθωμένης ακτινοβολίας με την μέθοδο Dark object για την Αττική (ii). (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019b).



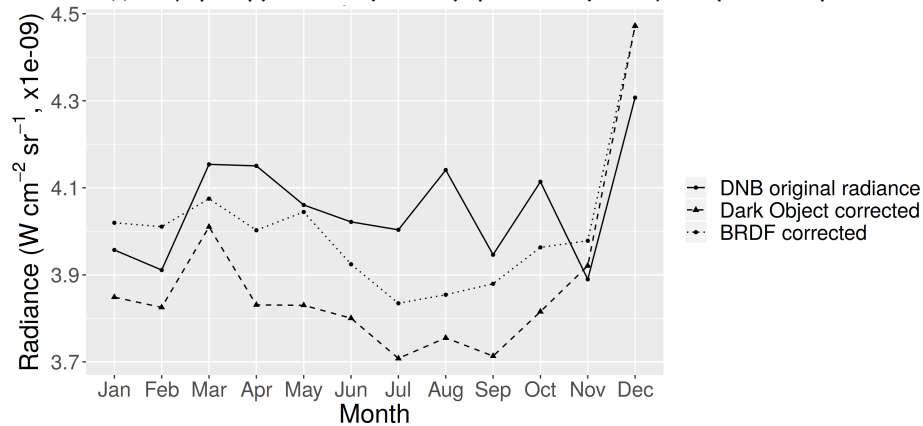
Διάγραμμα 21: (i) Σύγκριση του διάμεσου των διορθωμένων δεδομένων της Αττικής με τις δύο μεθόδους. (ii) Ο συντελεστής διόρθωσης Dark object. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019b).

Στο διάγραμμα 22 αποδίδονται ο μηνιαίος μέσος όρος και διάμεσος της ακτινοβολίας για την Αττική τόσο για τις δύο μεθόδους όσο και για τα αδιόρθωτα δεδομένα. Οι διακυμάνσεις στα διορθωμένα πλέον δεδομένα είναι πραγματική πληροφορία και όχι επίδραση της σελήνης και μπορεί να αποτελέσει την βάση για περαιτέρω έρευνα της αστικής δραστηριότητας στην Αττική.





(i) Σύγκριση μεθόδων με τον μηνιαίο διάμεσο για την Αττική



(ii) Σύγκριση μεθόδων με τον μηνιαίο μέσο για την Αττική

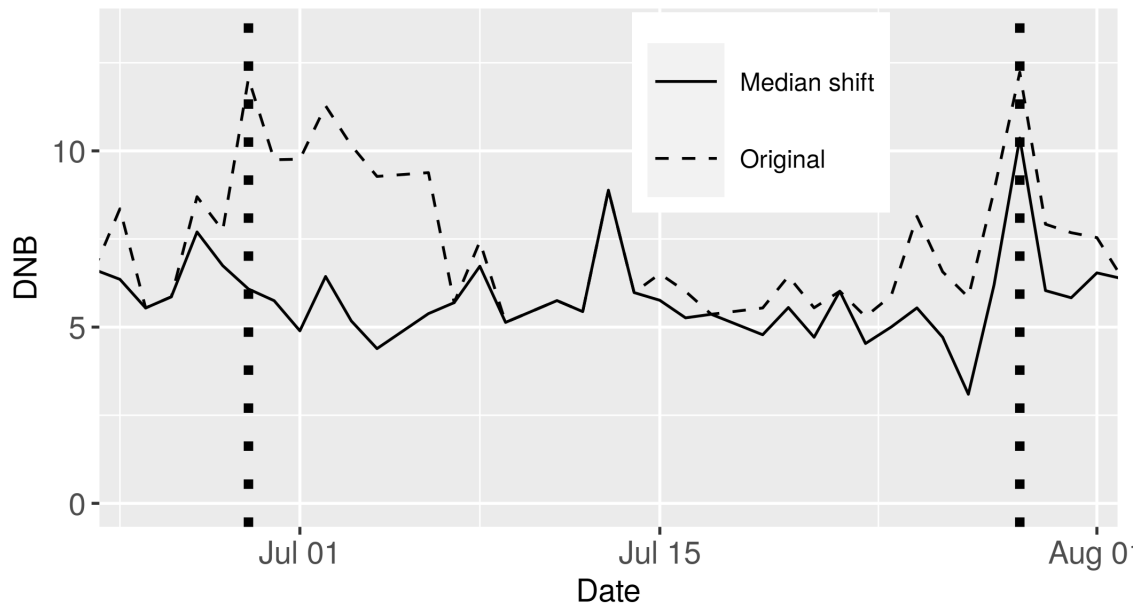
Διάγραμμα 22: Σύγκριση των μεθόδων διόρθωσης σεληνιακής ακτινοβολίας για την Αττική (Μηνιαίος μέσος και διάμεσος). (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019b).

#### 4.2.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ MEDIAN SHIFT

Στο τρέχον κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου Median Shift. Η διόρθωση των δεδομένων νυχτερινών φώτων από την επίδραση της πανσελήνου τον Ιανουάριο 2018 στην Μύκονο φαίνεται στο Διάγραμμα 24. Από την διόρθωση προκύπτει ότι ο διάμεσος των πρωτογενών τιμών κατά την πανσέληνο (Διάγραμμα 24i) μετατοπίζεται με βάση τις τιμές του νέου φεγγαριού (Διάγραμμα 24ii). Αντίστοιχη μετατόπιση συμβαίνει στα δεδομένα κάθε βραδιάς κατά την διόρθωση.

Στο Διάγραμμα 23, στο οποίο απεικονίζεται ο μέσος όρος των τιμών πριν και μετά την διόρθωση για τον μήνα Ιούλιο, είναι εμφανές ότι η περιοδική παραμόρφωση των τιμών από τον σεληνιακό κύκλο μετριάζεται. Οι περιοχές που καλύπτονται από νέφη εξαιρούνται από τον υπολογισμό του μέσου όρου. Κατά συνέπεια, ο μέσος όρος των τιμών που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα επηρεάζεται κατά μη συστηματικό τρόπο από την νεφοκάλυψη δεδομένου ότι διαφορετικές περιοχές καλύπτονται κάθε φορά, άλλοτε αστικές

άλλοτε μη αστικές.



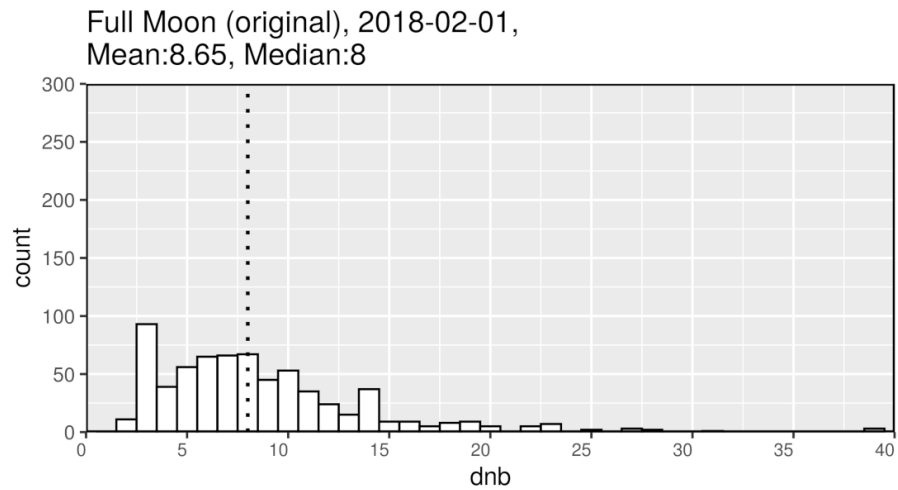
Διάγραμμα 23: Μύκονος: Διορθωμένα καθημερινά δεδομένα snpp-VIIRS με βάση την μέθοδο Median Shift. Οι κάθετες γραμμές με τα σημεία αντιστοιχούν σε πανσελήνους. (Πηγή: Stathakis2020).

Η αξιολόγηση της μεθοδολογίας είναι δύσκολο να επιτευχθεί δεδομένου ότι δεν υπάρχουν συγκριτικά δεδομένα με αντίστοιχο χρονικό βήμα. Έτσι, δύο μετρικά ενσωματώνονται για την αποτίμηση της βελτίωσης που προσφέρει η μεθοδολογία διόρθωσης “Median Shift”:

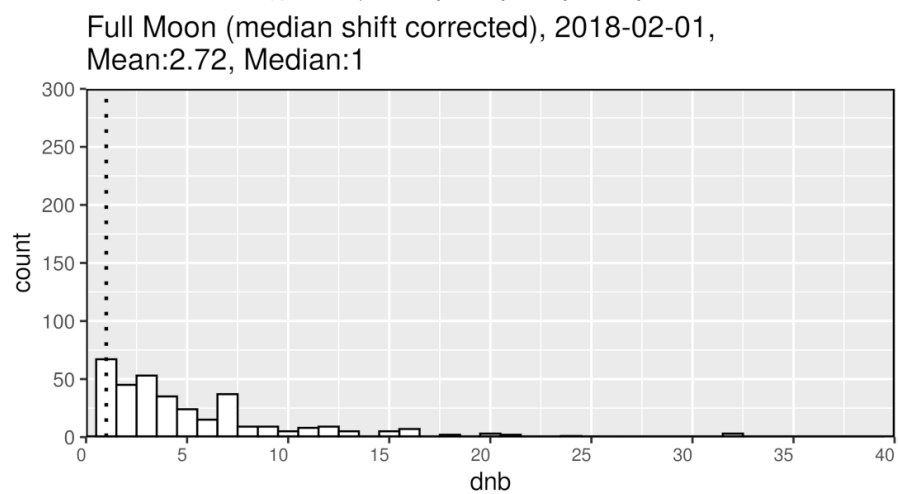
- η μέση διαφορά των μέσων όρων των τιμών ακτινοβολίας μιας ημέρας της σκηνής με την επόμενη.
- η απόκλιση από την γραμμή παλινδρόμησης δευτέρου βαθμού, η οποία προσαρμόζεται στον μέσο όρο τιμών κάθε νύχτας. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το τυπικό σφάλμα των υπολειμμάτων.

Και τα δύο μετρικά αποτελούν ένα μέσο της ομαλότητας των τιμών από την μία νύχτα στην άλλη. Αναμένεται ότι ο μέσος όρος των τιμών από την μία νύχτα στην επόμενη να είναι παρόμοιος. Απότομες διακυμάνσεις στα πρωτογενή δεδομένα αποδίδονται κυρίως στην σεληνιακή ακτινοβολία.

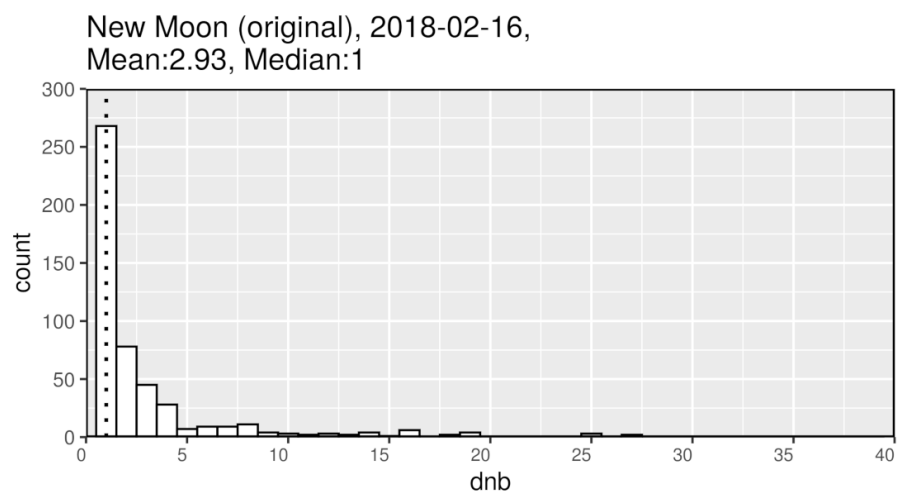
Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για μια μελέτη περίπτωσης (Μύκονος) με όρους τυπικού σφάλματος των υπολειμμάτων απεικονίζεται στο Διάγραμμα 25. Είναι προφανές ότι οι περιοδικές παραμορφώσεις στην πρωτογενή χρονοσειρά (25i), που προέρχονται



(i) Δεδομένα πριν την διόρθωση



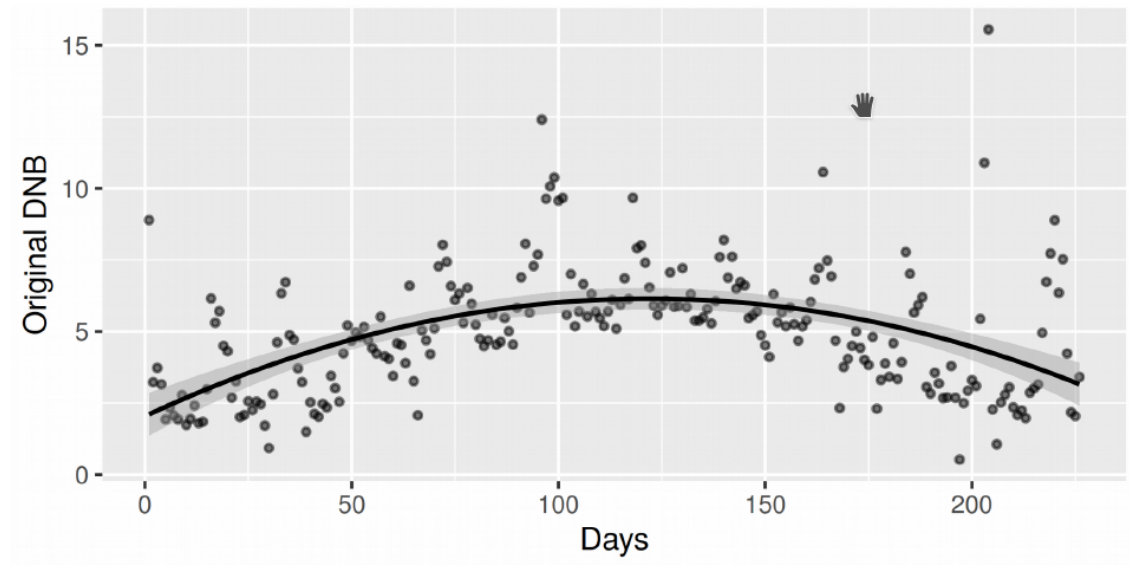
(ii) Δεδομένα μετά την διόρθωση



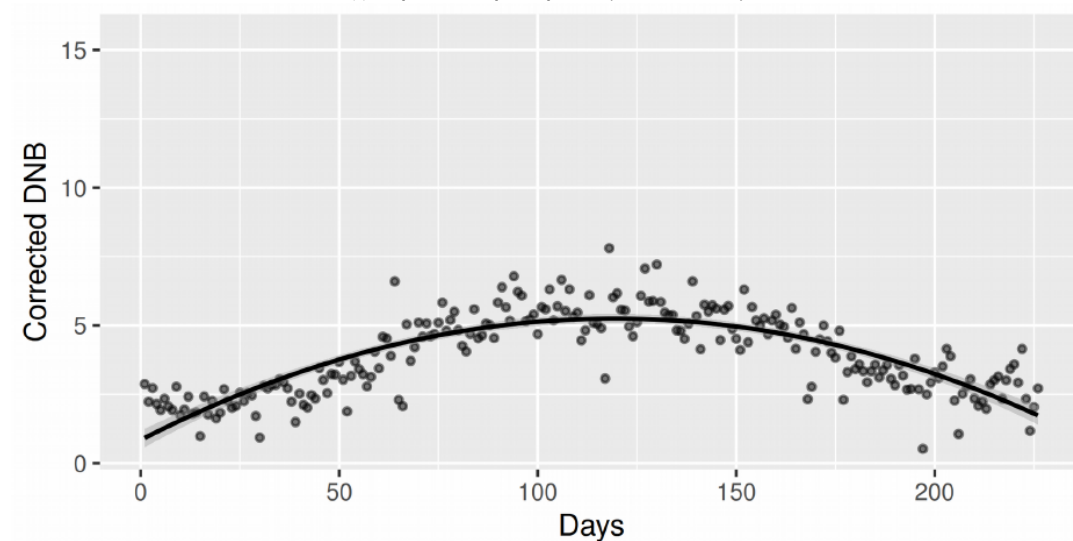
(iii) Δεδομένα αναφοράς

Διάγραμμα 24: Ιστόγραμμα των δεδομένα (i) πριν και (ii) μετά την διόρθωση Median Shift. Ο διορθωμένος διάμεσος (ii) προσεγγίζει τον διάμεσο των δεδομένων αναφοράς (iii) (νέα σελήνη). (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2020b).

από τον σεληνιακό κύκλο, διορθώνονται σε μεγάλο βαθμό με την μέθοδο "Median Shift" (25ii). Η διόρθωση για ένα πλήρες έτος δίδεται στο Διάγραμμα 26ίν. Όπως είναι αναμενόμενο, η γενική τάση των τιμών ακτινοβολίας που κορυφώνεται το καλοκαίρι στην Μύκονο λόγω τουρισμού, διατηρείται και μετά την διόρθωση (Stathakis και Baltas, 2018). Τα διορθωμένα από την μέθοδο δεδομένα ακολουθούν σε μικρότερο βαθμό τις κορυφές που δημιουργούνται στα πρωτογενή δεδομένα κατά τις φάσεις της πανσελήνου. Βέβαια, ορισμένες κορυφές κατά την πανσέληνο δεν έχουν εξαλειφθεί πλήρως γεγονός που αποδίδεται στην επίδραση της νεφοκάλυψης στον υπολογισμό του διαμέσου των τιμών για την εφαρμογή της διόρθωσης.



(i) Χρονοσειρά πρωτογενών δεδομένων



(ii) Χρονοσειρά διορθωμένων δεδομένων με την μέθοδο Median Shift

Διάγραμμα 25: Έλεγχος εγκυρότητας της διόρθωσης Median Shift με βάση την προσαρμογή στην γραμμή παλινδρόμησης β' βαθμού, στα πρωτογενή δεδομένα (i) και στα διορθωμένα δεδομένα (ii) για την Μύκονο. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2020b).

Τα αποτελέσματα για τις περιοχές μελέτης και όλες τις μεθόδους που δοκιμάστηκαν παρουσιάζονται στους Πίνακες 12 & 13. Από τους πίνακες προκύπτει ότι η προτεινόμενη μέθοδος σταθερά αποδίδει καλύτερα με βάση τα δύο μετρικά που ορίστηκαν. Με εξαίρεση την μέθοδο που προτείνεται από τον Elvidge (Elvidge et al., 2017) η οποία φαίνεται να αποδίδει καλύτερα. Ωστόσο αυτή η μέθοδος έχει το μειονέκτημα να απαλείφει σχεδόν τα μισά δεδομένα με βάση το κριτήριο στο όριο φωτεινότητας που θέτει.

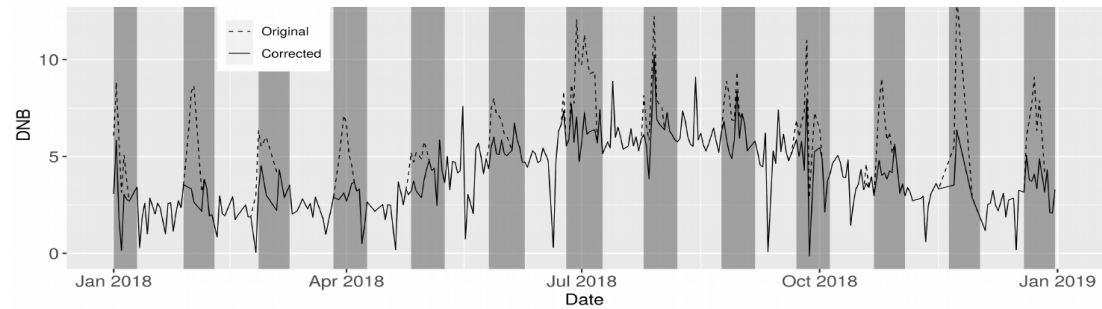
Mean Difference	Original	Elvidge	Dark Object	Roman	Cao	Median Shift
Μύκονος	1,16	0,80	1,09	0,99	1,11	0,86
Σαντορίνη	1,13	0,66	1,00	0,93	0,99	0,71
Κέα	0,59	0,13	0,41	0,43	0,49	0,25
Αίγινα	0,68	0,31	0,51	0,53	0,65	0,38
Σκιάθος	0,75	0,30	0,67	0,61	0,71	0,41
Ναύπλιο	1,67	1,22	1,6	1,55	1,65	1,23
Αθήνα	1,41	1,16	1,29	1,33	1,48	0,94
Σίφνος	0,71	0,17	0,48	0,53	0,61	0,30
Ύδρα	0,59	0,13	0,49	0,39	0,47	0,23

Πίνακας 12: Η μέση διαφορά του μέσου όρου των τιμών ακτινοβολίας μιας ημέρας με την επόμενη για τις περιοχές εφαρμογής της μεθόδου Median Shift. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2020b).

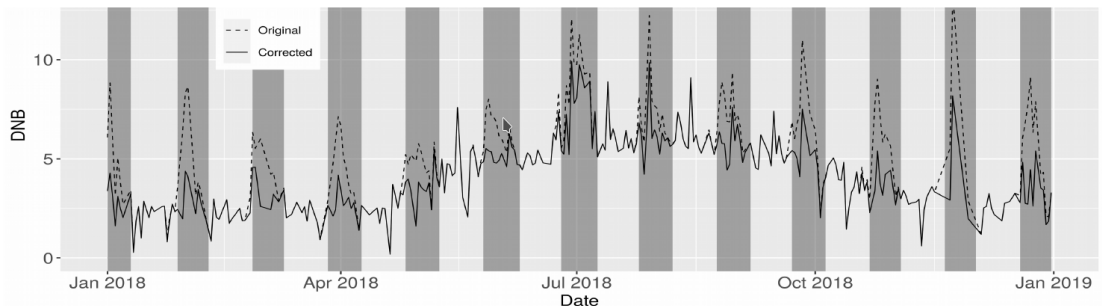
Res. st. error	Original	Elvidge	Dark Object	Roman	Cao	Median Shift
Μύκονος	1.97	1.13	1.41	1.32	1.16	1.16
Σαντορίνη	2,07	0.80	1.34	1.33	0.85	0.85
Κέα	1.50	0.13	0.53	0.84	0.40	0.37
Αίγινα	1.48	0.30	0.59	0.85	0.41	0.41
Σκιάθος	1.46	0.36	0.85	1.02	0.50	0.49
Ναύπλιο	2.16	1.28	1.71	1.76	1.36	1.36
Αθήνα	2.07	1.24	1.44	1.54	1.22	1.22
Σίφνος	1.74	0.19	0.71	1.08	0.46	0.44
Ύδρα	1.43	0.15	0.60	0.82	0.34	0.34

Πίνακας 13: Το τυπικό σφάλμα των υπολειμμάτων (Residual Standard Error) για τις περιοχές εφαρμογής της μεθόδου Median Shift. (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2020b).

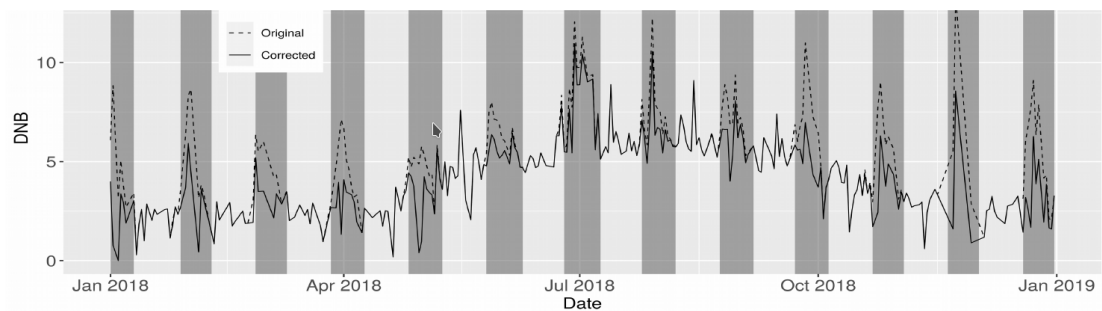
Οι εικόνες που αποκλείονται από την χρονοσειρά με την μέθοδο Elvidge φαίνονται σαν σκιασμένες περιοχές στο Διάγραμμα 26. Αντίθετα, η προτεινόμενη μέθοδος δεν αποκλείει καμία εικόνα. Κατά συνέπεια, η μέθοδος είναι η πιο κατάλληλη για την εκμετάλλευση των 24-ωρων δεδομένων snrrp-VIIRS προσφέροντας έναν ικανοποιητικό βαθμό διόρθωσης. Επιπλέον, έχει το προτέρημα να είναι εύκολη στην χρήση και ταυτόχρονα αποδοτική καθιστώντας την ιδανική επιλογή για την έρευνα της αστικής δυναμικής σε 24-ωρη βάση.



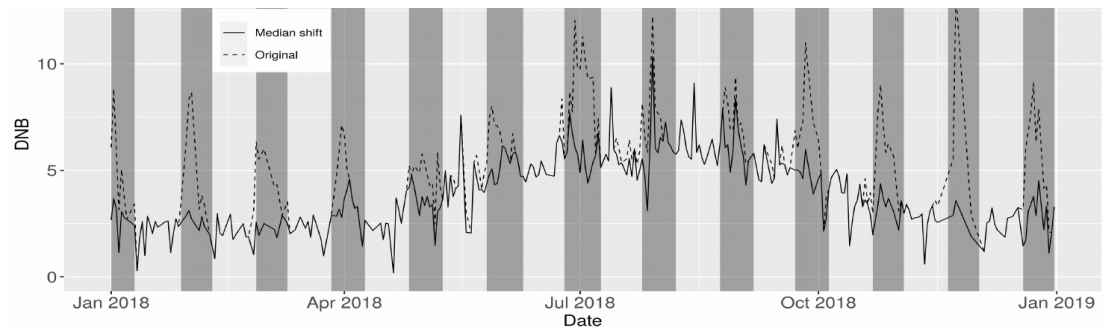
(i) Διόρθωση με την μέθοδο Dark Object (Stathakis και Liakos, 2019b)



(ii) Διόρθωση με την μέθοδο Roman (Román et al., 2018)



(iii) Διόρθωση με την μέθοδο Cao (Cao et al., 2013)



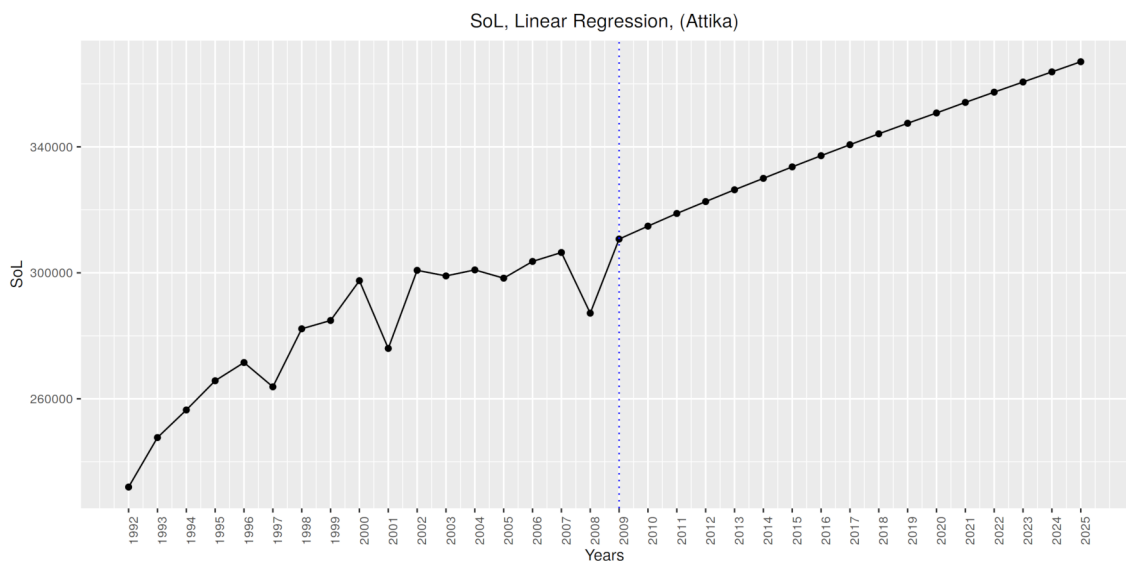
(iv) Διόρθωση με την μέθοδο Median Shift

Διάγραμμα 26: Διόρθωση σεληνιακής ακτινοβολίας από τα δεδομένα VIIRS ανά μέθοδο για την Μύκονο το 2018. Οι σκιασμένες περιοχές του γραφήματος αντιστοιχούν σε ημέρες κοντά στην πανσέληνο με σεληνιακή φωτεινότητα 0.0005 lux οι οποίες αγνοούνται από την μέθοδο του Elvidge (2017). (Πηγή: Stathakis και Liakos, 2019b).

### 4.3 ΝΥΧΤΕΡΙΝΑ ΦΩΤΑ ΚΑΙ ΑΣΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

#### 4.3.1 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ DMSP/OLS

Στο Διάγραμμα 27 απεικονίζεται το αποτέλεσμα της πρόβλεψης με το γραμμικό μοντέλο του δείκτη SoL για την Αττική από το 2009 μέχρι το 2025. Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα η ένταση των νυχτερινών φώτων προβλέπεται να αυξηθεί γραμμικά κατά το μέλλον ακολουθώντας την γενική τάση της μεταβολής τους κατά το παρελθόν.

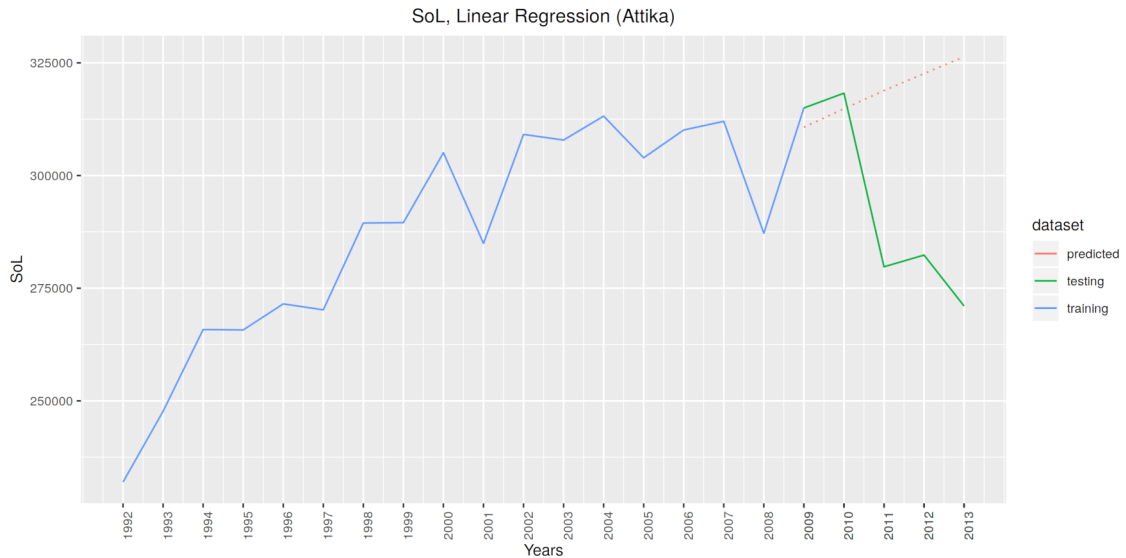


Διάγραμμα 27: Δείκτης SoL και πρόβλεψή του με γραμμικό μοντέλο για την περίοδο 2019-2025 για την Αττική. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Αν ελέγξουμε την εγκυρότητα του δείκτη με την δοκιμαστική (testing) περίοδο 2009-2013 (Διάγραμμα 28) θα δούμε ότι το 2009 και 2010 το μοντέλο συμπίπτει σε ικανοποιητικό βαθμό. Όμως από το 2010 ως το 2013 το αποτέλεσμα του γραμμικού μοντέλου δεν ταυτίζεται με την πραγματική διακύμανση κατά την περίοδο αυτή.

Χωρίς να έχουμε χρησιμοποιήσει δεδομένα οικονομική φύσεως (π.χ. ΑΕΠ ή απασχόληση) και με απόλυτο κριτήριο την υπόθεση εργασίας ότι η ένταση των νυχτερινών φώτων συσχετίζεται με την οικονομική δραστηριότητα, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι αυτή η σημαντική πτώση στην ένταση της ακτινοβολίας στην Αττική είναι το αντίκτυπο της οικονομικής κρίσης που έπληξε την Ελλάδα την περίοδο αυτή. Το μοντέλο ωστόσο ακολουθώντας την μακροχρόνια τάση από το 1992 ως το 2009 αδυνατεί να προσαρμοστεί σε μια τόσο βραχυχρόνια μεταβολή. Κατά συνέπεια προσαρμόζεται στην γενικότερη παρελθούσα τάση η οποία είναι αύξουσα και όπως δείχνει το συγκεκριμένο μοντέλο θα ισχύει και στο μέλλον.

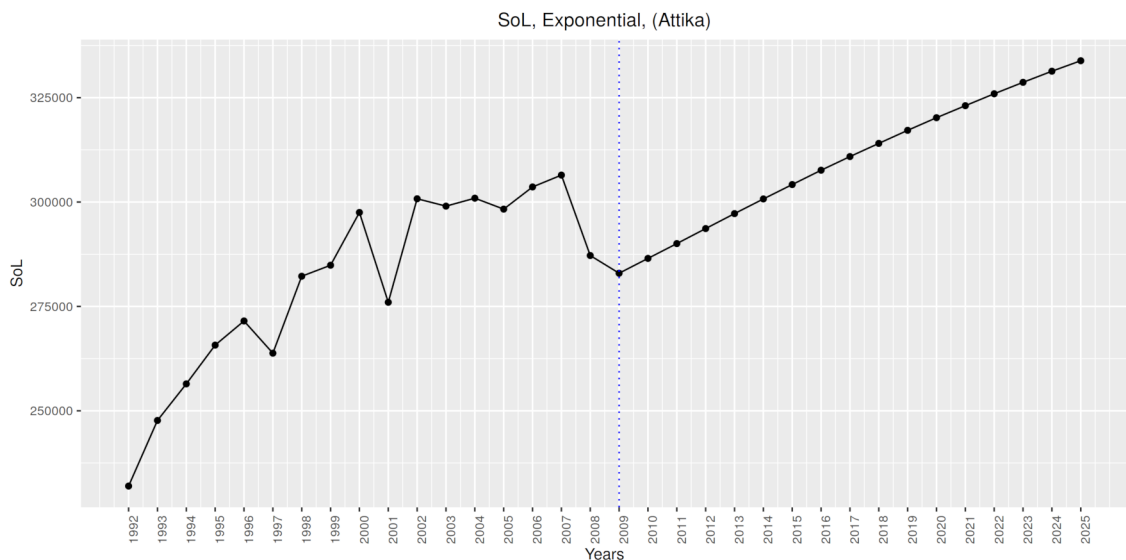




Διάγραμμα 28: Έλεγχος εγκυρότητας της πρόβλεψης του SoL με γραμμικό μοντέλο για την περίοδο 2009-2025 για την Αττική. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

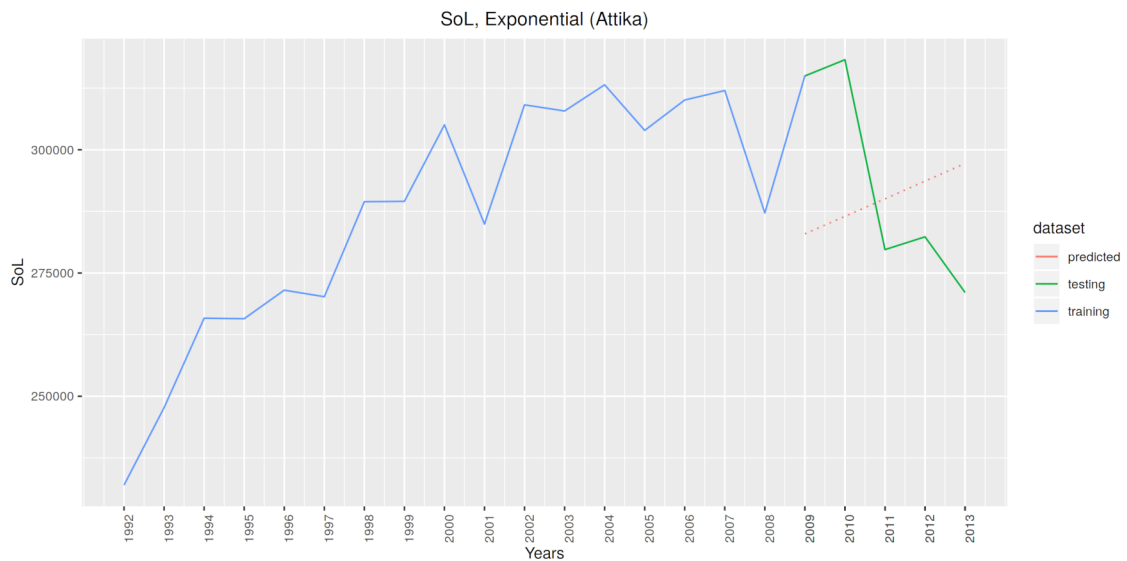
Αντίστοιχη είναι και η πρόβλεψη που προκύπτει από το εκθετικό μοντέλο (βλ. Διάγραμμα 29).

Από την άλλη, το μοντέλο πρόβλεψης με πολυώνυμο β' βαθμού (βλ. Διάγραμμα 31), προβλέπει μακροχρόνια την πτώση του δείκτη SoL. Ενδεχομένως η τάση αυτή έχει επηρεαστεί από την πτωτική τάση της περιόδου 2009-2013. Ειδικά, κατά την περίοδο αυτή (testing) το μοντέλο διαγραμματικά τουλάχιστον ταυτίζεται σε μεγάλο βαθμό (βλ. Διάγραμμα 32).

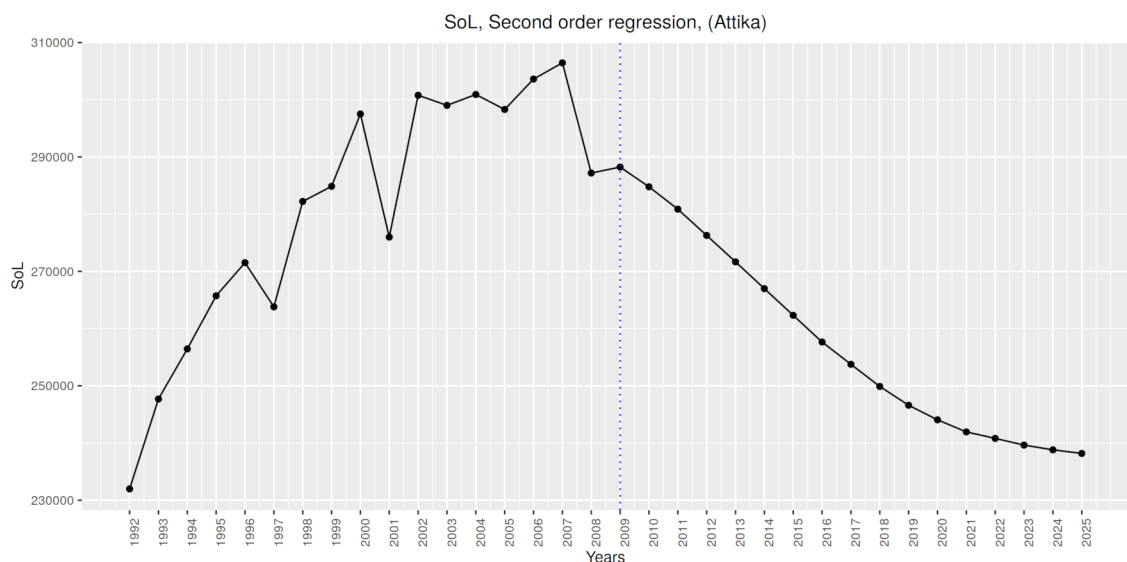


Διάγραμμα 29: Δείκτης SoL και πρόβλεψή του με εκθετικό μοντέλο για την περίοδο 2009-2025 για την Αττική. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

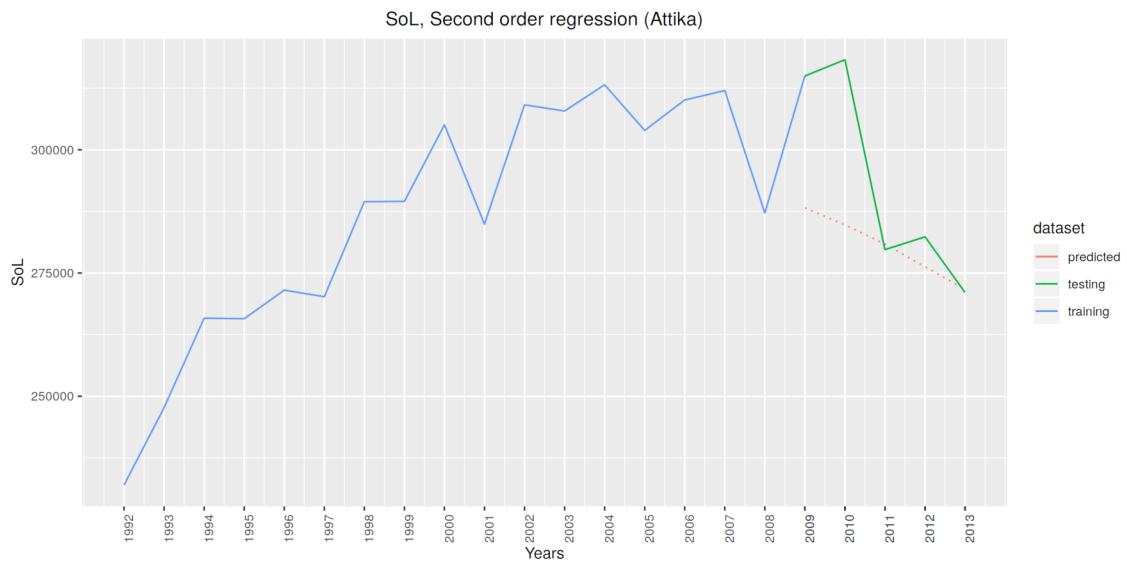
Αντίστοιχες παρατηρήσεις προκύπτουν από την εφαρμογή των μοντέλων πρόβλεψης



Διάγραμμα 30: Έλεγχος εγκυρότητας της πρόβλεψης του SoL με το εκθετικό μοντέλο για την περίοδο 2009-2025 για την Αττική (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

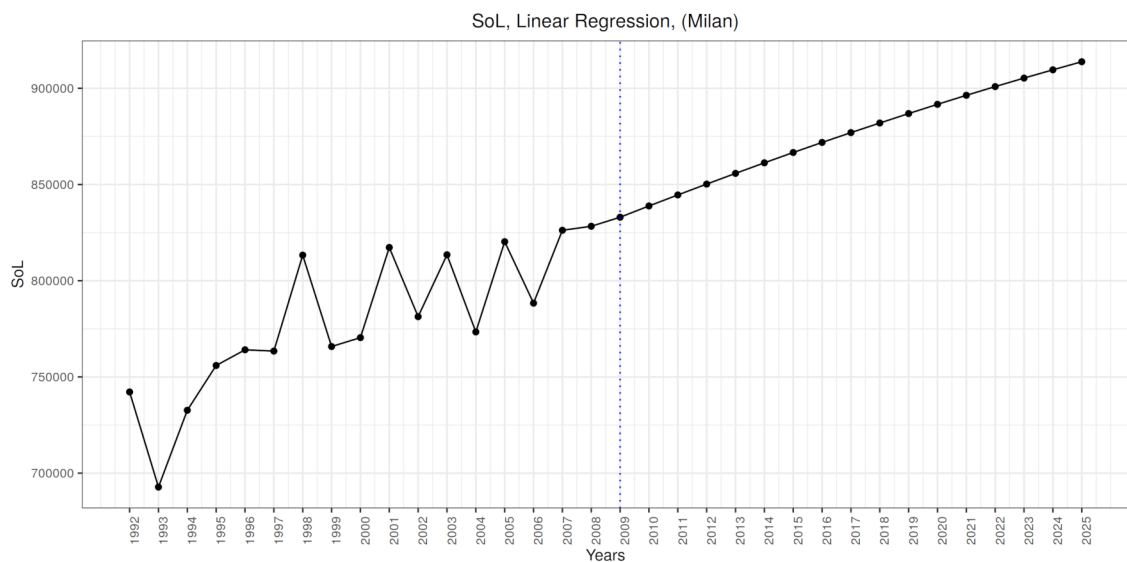


Διάγραμμα 31: Δείκτης SoL και πρόβλεψή του με μοντέλο πολυωνμικής παλινδρόμησης β' βαθμού για την περίοδο 2009-2025 για την Αττική. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



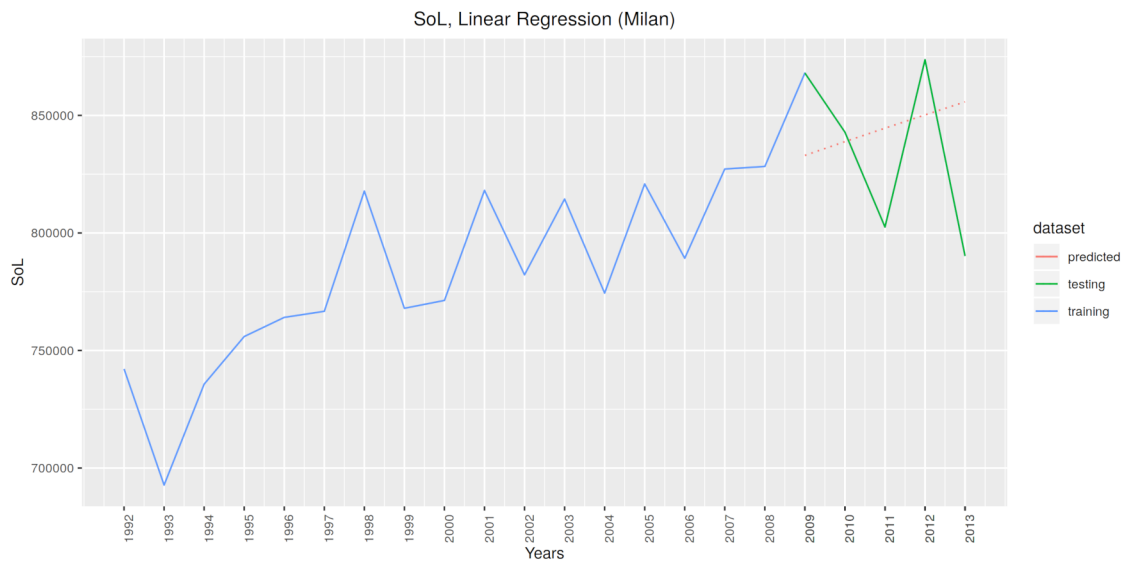
Διάγραμμα 32: Έλεγχος εγκυρότητας της πρόβλεψης του SoL με το μοντέλο πολυωνμικής παλινδρόμησης β' βαθμού για την περίοδο 2009-2025 για την Αττική. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

και για το Μιλάνο (βλ. διαγράμματα 33 και 34). Τόσο το γραμμικό όσο και το εκθετικό μοντέλο προβλέπουν αύξηση του δείκτη SoL ως το 2025. Το πολυωνμικό μοντέλο προβλέπει μείωση σε μικρότερο ρυθμό συγκριτικά με την Αθήνα και σε επίπεδα που προσεγγίζουν ένα μέσο επίπεδο του SoL της παρελθούσας περιόδου.

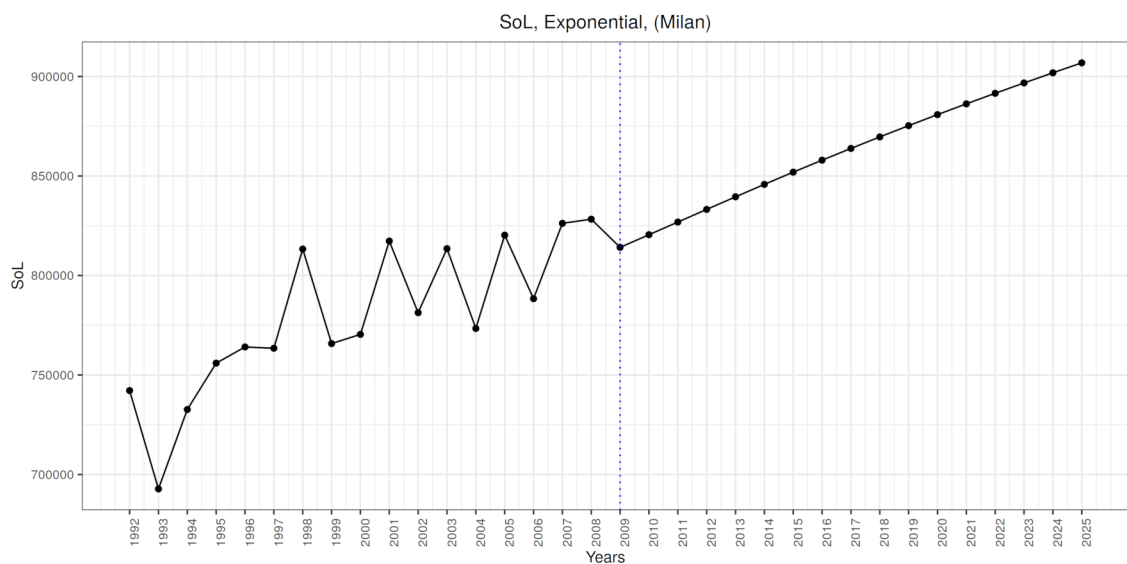


Διάγραμμα 33: Δείκτης SoL και πρόβλεψή του με γραμμική μοντέλο για την περίοδο 2009-2025 για το Μιλάνο. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

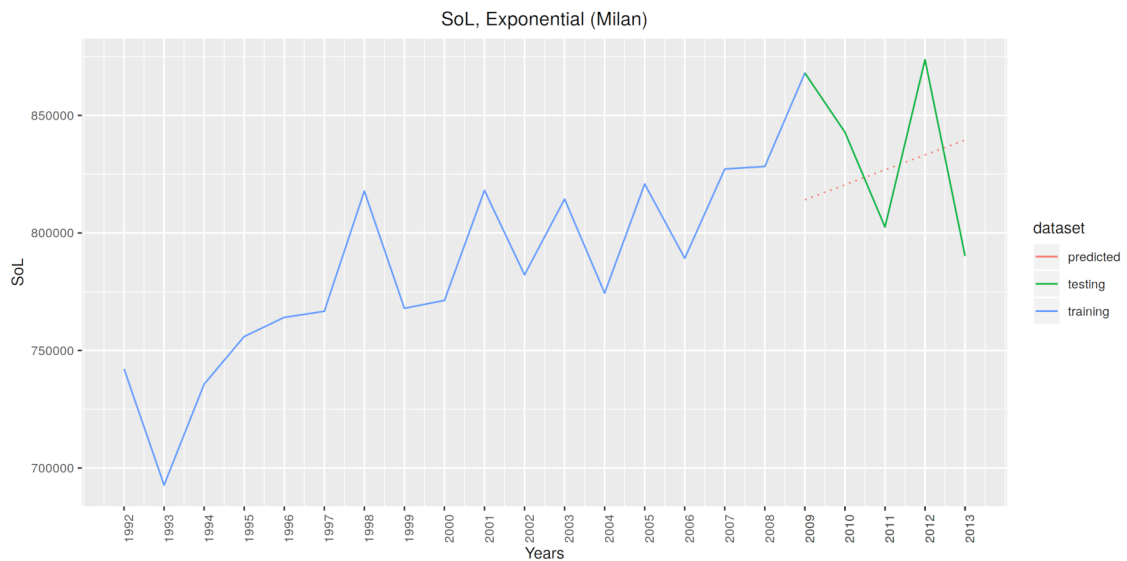
Σε όλες τις περιπτώσεις πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι δεν έχει γίνει κανένας έλεγχος των δεδομένων για ακραίες τιμές (outliers) ή άλλους επιδραστικούς παράγοντες επί του αποτελέσματος. Η ένταση του νυχτερινού φωτός προβλέπεται με παρελθούσα χρονοσειρά και αγνοεί παντελώς την επίδραση άλλων κοινωνικο-οικονομικών παραγόντων και του



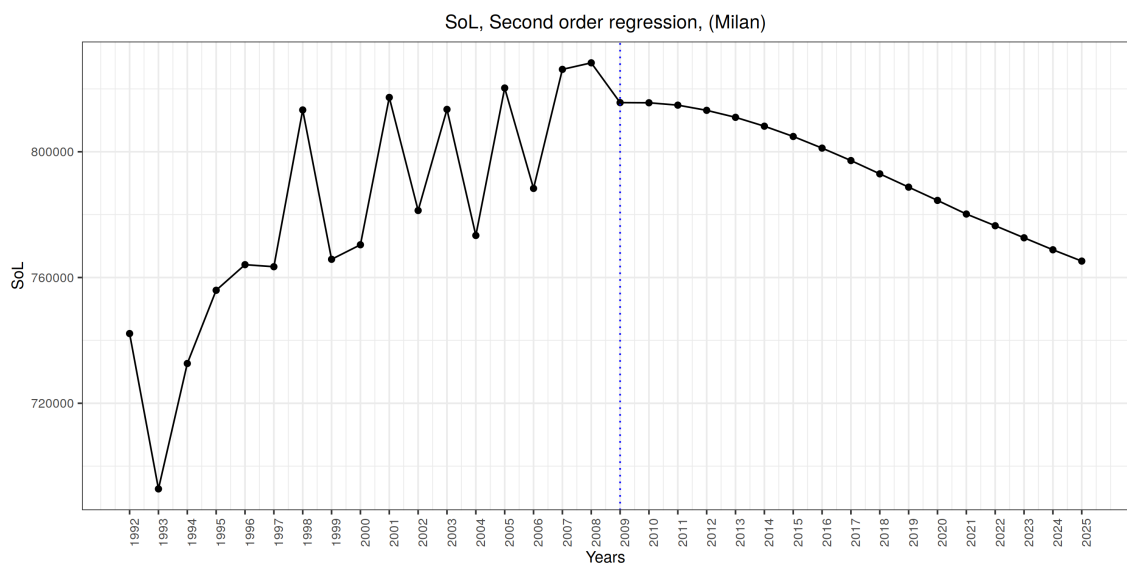
Διάγραμμα 34: Έλεγχος εγκυρότητα της πρόβλεψης του SoL με γραμμικό μοντέλο για την περίοδο 2009-2025 για το Μιλάνο (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



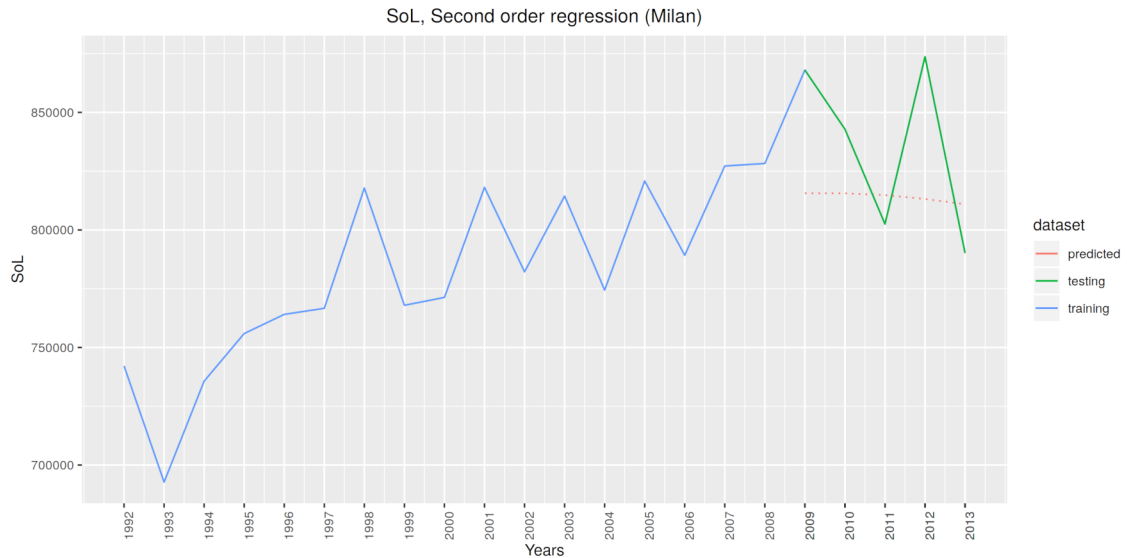
Διάγραμμα 35: Δείκτης SoL και πρόβλεψή του με εκθετικό μοντέλο για την περίοδο 2009-2025 για το Μιλάνο. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



Διάγραμμα 36: Έλεγχος εγκυρότητας της πρόβλεψης του SoL με το εκθετικό μοντέλο για την περίοδο 2009-2025 για το Μιλάνο. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



Διάγραμμα 37: Δείκτης SoL και πρόβλεψή του με μοντέλο πολυωνμικής παλινδρόμησης β' βαθμού για την περίοδο 2009-2025 για το Μιλάνο. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



Διάγραμμα 38: Έλεγχος εγκυρότητας της πρόβλεψης του SoL με το μοντέλο πολυωνμικής παλινδρόμησης β' βαθμού για την περίοδο 2009-2025 για το Μιλάνο. (Πηγή: ιδία επεξεργασία).

χωροταξικού σχεδιασμού που μπορεί να επηρεάσει την εξέλιξη μιας πόλης. Ουσιαστικά πρόκειται για προβλέψεις που στηρίζονται μόνο σε στατιστικές μεθόδους. Αλλά και οι εν γένει αδυναμίες των νυχτερινών φώτων DMSP/OLS (κορεσμός, υπερ-λάμψη) μπορεί να αποτελέσουν στρεβλά δεδομένα εισόδου στο κάθε μοντέλο και να επηρεάσουν την τελική πρόβλεψη. Σε μελλοντικές προσπάθειες θα μπορούσαν να εφαρμοστούν δυναμικά μοντέλα παλινδρόμησης που να λαμβάνουν υπόψιν τους επιπλέον παράγοντες (predictors) που επηρεάζουν την δυναμική μιας πόλης.

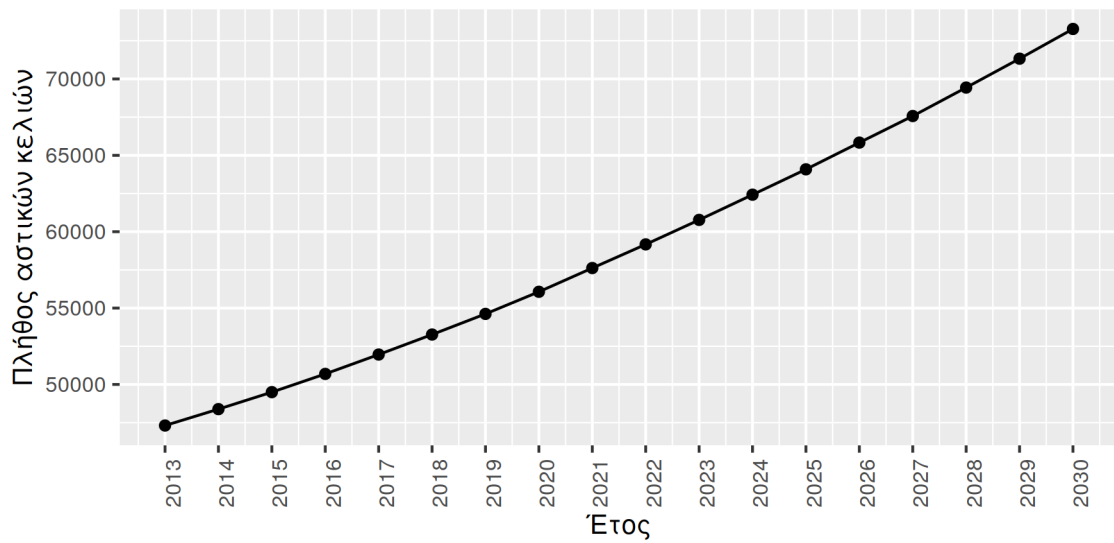
#### 4.3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ SLEUTH

Από την προσομοίωση του μοντέλου SLEUTH παρατηρείται η συνεχόμενη διάχυση των κυριότερων ελληνικών αστικών κέντρων (βλ. Διάγραμμα 39). Ενδεικτικά, στους Χάρτες 13 και 14 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του μοντέλου και η προσομοίωση της αστικής διάχυσης σημαντικών περιοχών του ελλαδικού χώρου κατά τα έτη 2020 και 2030. Από το Διάγραμμα 39 προκύπτει ότι οι αστικές περιοχές θα εξαπλώνονται στον χώρο με γραμμικό σχεδόν ρυθμό. Πιο αναλυτικά επικεντρώνοντας στην κατανομή και διάχυση των αστικών περιοχών σε περιφερειακό επίπεδο (βλ. Διάγραμμα 40), παρατηρείται η επικράτηση των περιφερειών της Αττικής και Κεντρικής Μακεδονίας (με όρους αστικής έκτασης).

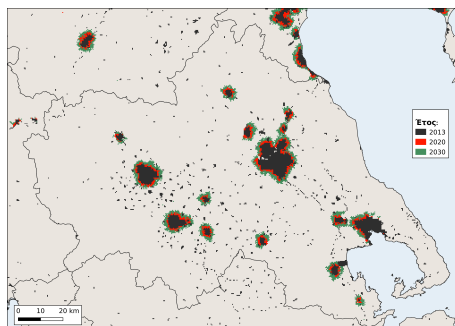
Το χαρακτηριστικό όμως που προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου είναι ότι η αστική διάχυση στην περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας προβλέπεται να είναι πιο έντονη με αποτέλεσμα μέχρι το 2030 η έκτασή της να είναι μεγαλύτερη από αυτή της Αττικής. Ωστόσο, το ποσοστό της αστικών εκτάσεων ανά περιφέρεια επί της συνολικής έκτασης (βλ. Διάγραμμα 41) της καταδεικνύει διαφορετικά πρότυπα. Σταθερά η Αττική είναι μια υπερδομημένη περιφέρεια σε σχέση με την έκτασή της, με ποσοστά που υπερβαίνουν το 40 %, τάση η οποία προβλέπεται αναπόφευκτα και για το μέλλον.

Την Αττική ακολουθεί η περιφέρεια Ιονίων νήσων και Κεντρικής Μακεδονίας όσον αφορά το ποσοστό κάλυψης της αστικής γης επί της συνολικής της έκτασης. Στο Διάγραμμα 42 (και στον Πίνακα 14) περιγράφεται διαχρονικά το ποσοστό της αστικής γης της κάθε περιφέρειας επί της συνολικής αστικής έκτασης της χώρας (εξαιρείται το Άγιο Όρος). Παρατηρείται ότι μέχρι το 2030 η Αττική μειώνει το ποσοστό αστικής γης επί του συνόλου ενώ αντιθέτως η περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας αυξάνει το αντίστοιχο ποσοστό. Αξιόλογο ποσοστό αστικής γης κατέχει και η περιφέρεια Θεσσαλίας το οποίο διαχρονικά προβλέπεται να αυξηθεί. Η Στερεά Ελλάδα, η Πελοπόννησος, η Κρήτη, η Ήπειρος προβλέπεται να διατηρήσουν σταθερά ποσοστά αστικής γης επί του συνόλου κατά το μέλλον. Χαρακτηριστικό είναι το μικρό ποσοστό αστικών εκτάσεων των νησιωτικών περιφερειών (Βορείου Αιγαίου, Νοτίου Αιγαίου, Ιονίων νήσων και Κρήτης). Εξίσου μικρά ποσοστά κατέχουν και οι περιφέρειες Δυτικής Ελλάδας και Δυτικής Μακεδονίας, οι οποίες αναμένεται να αυξήσουν τα σχετικά ποσοστά στο μέλλον.

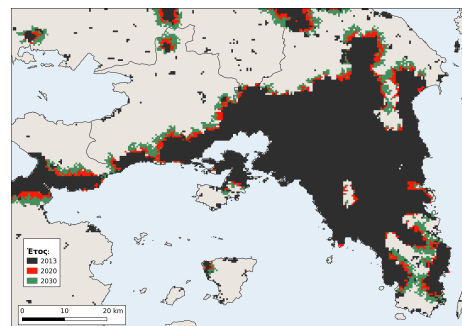
Ορθώς το μοντέλο αποδίδει κατά την προσομοίωση την περιορισμένη έως μηδενική αστική διάχυση στο Άγιο Όρος (αυτοδιοίκητο) και το ελάχιστο ποσοστό αστικών περιοχών σε αυτό. Συμπερασματικά, φαίνεται ότι ο υπερκορεσμός της αστικοποίησης στην περιφέρεια Αττικής θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των ρυθμών αστικοποίησης της και την επακόλουθη ανάδειξη νέων, ταχύτερα διαχεόμενων αστικών κέντρων στην Βόρεια Ελλάδα και Κεντρική Ελλάδα (περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Θεσσαλίας).



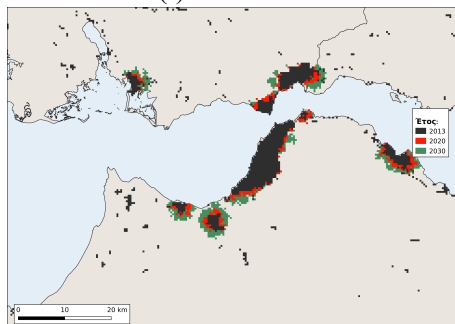
Διάγραμμα 39: Πρόβλεψη της συνολικής αστικής έκτασης σύμφωνα με το μοντέλο SLEUTH στην Ελλάδα μέχρι το 2030. (Πηγή: ιδία επεξεργασία).



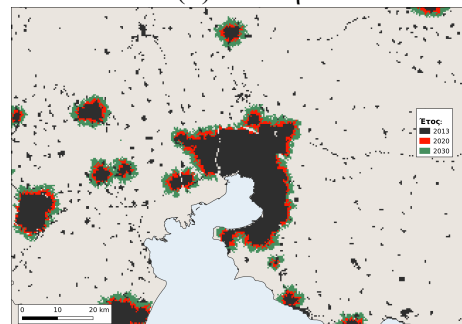
(i) Θεσσαλία



(ii) Αττική



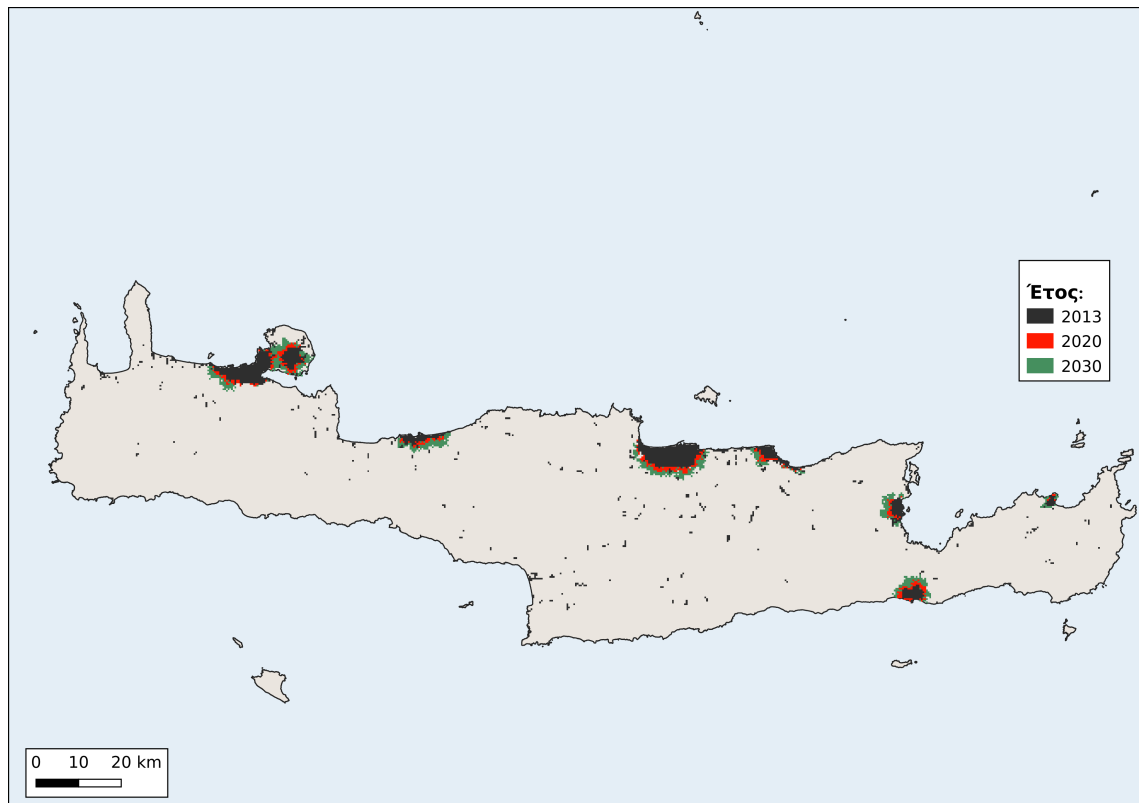
(iii) Πάτρα



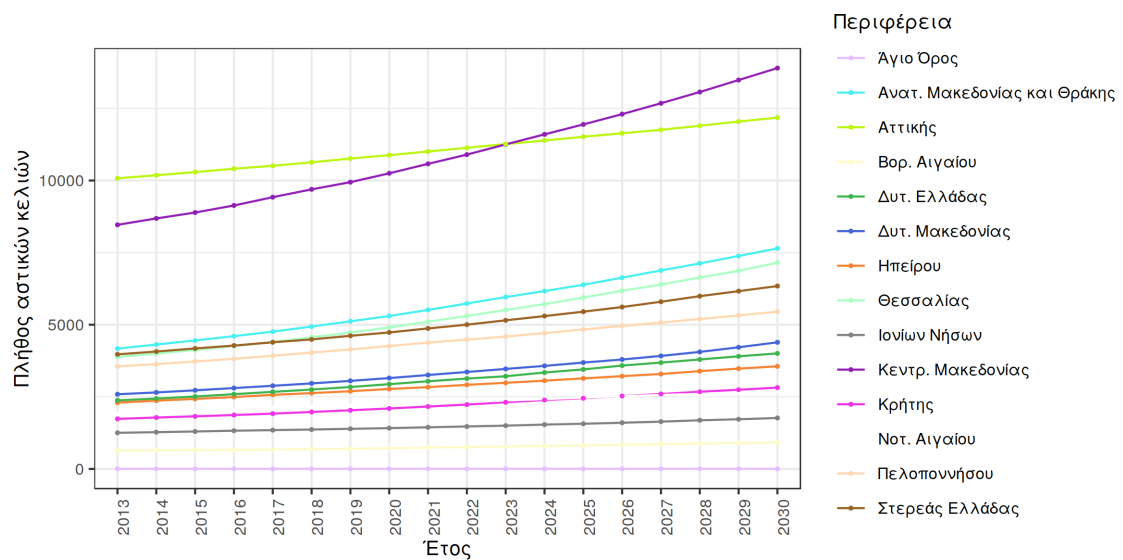
(iv) Θεσσαλονίκη

Χάρτης 13: Προσομοίωση αστικής διάχυσης στην (i) Θεσσαλία, (ii) Αττική, (iii) Πάτρα, (iv) Θεσσαλονίκη με βάση το μοντέλο SLEUTH. (Πηγή: ιδία επεξεργασία).

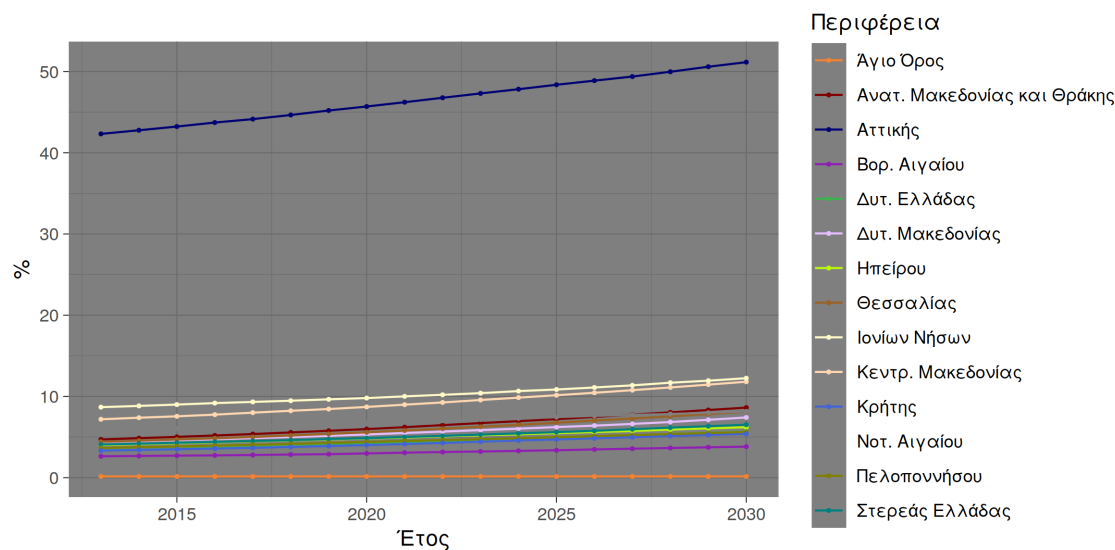




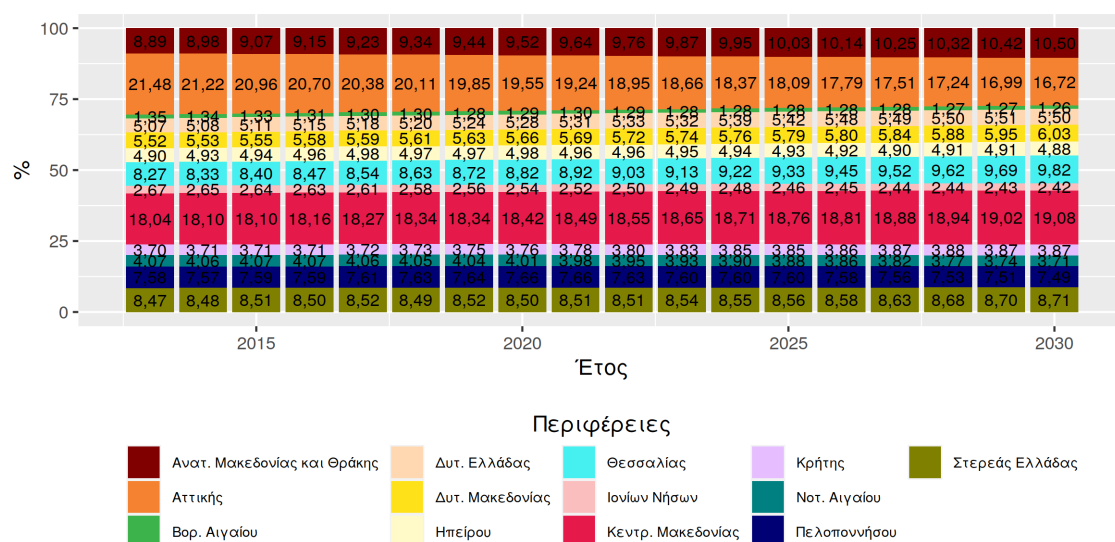
Χάρτης 14: Προσομοίωση αστικής διάχυσης στην Κρήτη με το μοντέλο SLEUTH. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



Διάγραμμα 40: Μεταβολή της έκτασης των αστικών περιοχών ανά περιφέρεια. Πρόβλεψη με το μοντέλο SLEUTH. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



Διάγραμμα 41: Μεταβολή του ποσοστού της έκτασης αστικών περιοχών επί της συνολικής έκτασης ανά περιφέρεια. Πρόβλεψη με το μοντέλο SLEUTH. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



Διάγραμμα 42: Ποσοστό αστικής έκτασης ανά περιφέρεια επί της συνολικής αστικής έκτασης της Ελλάδας. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Περιφέρεια	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Ανατ. Μακεδονίας & Θράκης	8,89	8,99	9,07	9,15	9,23	9,34	9,44	9,53	9,64	9,76	9,87	9,95	10,03	10,14	10,25	10,33	10,42	10,50
Κεντρ. Μακεδονίας	18,04	18,10	18,11	18,16	18,27	18,34	18,34	18,42	18,49	18,55	18,65	18,71	18,77	18,81	18,88	18,94	19,02	19,08
Δυτ. Μακεδονίας	5,52	5,53	5,55	5,58	5,59	5,61	5,63	5,66	5,69	5,72	5,75	5,76	5,79	5,80	5,84	5,88	5,95	6,03
Ηπείρου	4,90	4,93	4,94	4,96	4,98	4,97	4,97	4,98	4,96	4,96	4,95	4,94	4,93	4,92	4,90	4,91	4,91	4,89
Θεσσαλίας	8,27	8,33	8,40	8,47	8,54	8,63	8,72	8,82	8,92	9,03	9,13	9,22	9,33	9,45	9,52	9,62	9,69	9,82
Σπερτιάς Ελλάδας	8,47	8,48	8,51	8,50	8,52	8,49	8,52	8,50	8,51	8,51	8,54	8,55	8,57	8,58	8,63	8,68	8,70	8,71
Ιονίων Νήσων	2,67	2,65	2,64	2,63	2,61	2,58	2,57	2,54	2,52	2,50	2,49	2,48	2,46	2,45	2,44	2,44	2,43	2,42
Δυτ. Ελλάδας	5,07	5,08	5,11	5,15	5,18	5,21	5,24	5,28	5,31	5,33	5,32	5,39	5,42	5,48	5,49	5,50	5,51	5,50
Πελοποννήσου	7,58	7,57	7,59	7,59	7,61	7,63	7,64	7,66	7,66	7,63	7,61	7,60	7,60	7,58	7,56	7,53	7,51	7,49
Αττικής	21,48	21,22	20,96	20,70	20,38	20,11	19,85	19,55	19,24	18,95	18,66	18,37	18,09	17,79	17,51	17,24	16,99	16,72
Βορ. Αιγαίου	1,35	1,34	1,33	1,31	1,30	1,30	1,28	1,29	1,30	1,29	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,27	1,27	1,26
Νοτ. Αιγαίου	4,07	4,06	4,07	4,07	4,06	4,05	4,04	4,01	3,98	3,95	3,93	3,90	3,88	3,86	3,82	3,77	3,74	3,71
Κρήτης	3,70	3,71	3,71	3,71	3,72	3,73	3,75	3,77	3,78	3,80	3,83	3,85	3,85	3,86	3,87	3,88	3,87	3,87
Άγιο Όρος	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00

Πίνακας 14: Πρόβλεψη με το μοντέλο SLEUTH του ποσοστού αστικής έκτασης της κάθε περιφέρειας επί της συνολικής αστικής έκτασης της Ελλάδας. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).

#### 4.3.2.1 ΑΔΥΝΑΜΙΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ SLEUTH ΚΑΙ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ

Το μοντέλο SLEUTH στηρίζει την προσομοίωσή του σε ιστορικά δεδομένα. Στην τρέχουσα έρευνα τα ιστορικά δεδομένα αστικών περιοχών αποδίδονται από τα δεδομένα DMSP/OLS, τα οποία, όπως έχει προαναφερθεί, διέπονται από το πρόβλημα της υπερλάμψης (overglow) με αποτέλεσμα να «μεγεθύνεται» η έκταση των αστικών περιοχών.

Για την διόρθωση του φαινομένου της υπερ-λάμψης εφαρμόστηκε ενιαίο και καθολικό φίλτρο στις τιμές των εικόνων όπου αστικές περιοχές θεωρήθηκαν μόνο όσες έχουν τιμές  $DN > 30$ . Η μέθοδος αυτή περιορίζει την έκταση που αποδίδεται εσφαλμένα ως αστική ως απόρροια του φαινομένου της υπερ-λάμψης. Από την άλλη έχει το μειονέκτημα μικροί αστικοί πυρήνες, χαμηλής δραστηριότητας, και αγροτικοί οικισμοί να μην αποδίδονται και να μην εντάσσονται στην προσομοίωση του μοντέλου.

Κατά συνέπεια κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης (και την επακόλουθη διεξαγωγή των συμπερασμάτων) η έρευνα είναι μεροληπτική με μεγαλύτερη βαρύτητα σε συμπαγείς αστικές περιοχές με έντονη αστική δραστηριότητα. Στα αρνητικά σημεία του μοντέλου συγκαταλέγεται και η ανάγκη για υψηλές απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους και χρόνο, που με τον τρέχοντα εξοπλισμό και την χωρική διακριτική ικανότητα των δεδομένων επέβαλε τον αποκλεισμό ελάχιστων περιοχών του ελληνικού χώρου (Καστελλόριζο).

Επιπλέον, το μοντέλο βασίζεται σε παραδοχές που έχουν γίνει από την θεωρία των κυψελοειδών αυτόματων και σε εν γένει αδυναμίες αυτής (Wolfram, 1985). Ακόμα, ο αριθμός των επαναλήψεων Monte Carlo είναι ασαφές πως μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα της βαθμονόμησης (Goldstein et al., 2005). Ενώ, κριτική έχει υποστεί τόσο ο αλγόριθμος Deltatron που αφορά την βαθμονόμηση των χρήσεων γης όσο και ο αλγόριθμος βαρύτητας του οδικού δικτύου και ο αλγόριθμος «αντίστασης» στην αστική εξάπλωση από την κλίση του αναγλύφου (Clarke, 2008).

Ο χρονικός ορίζοντας στον οποίο θα γίνει η προσομοίωση είναι ένας ακόμα παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει το αποτέλεσμα σύμφωνα με τον Candau (2002). Τέλος, η ποιότητα και αξιοπιστία των δεδομένων εισόδου (οδικό δίκτυο, καλύψεις γης) μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μοντέλου.

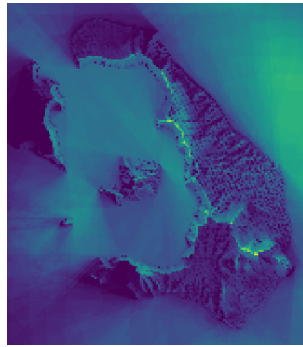
### 4.3.3 ΔΕΙΚΤΗΣ ΦΩΤΟΡΥΠΑΝΣΗΣ ΜΕ ΝΥΧΤΕΡΙΝΑ ΦΩΤΑ

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του δείκτη στα δύο νησιά, Μύκονο και Σαντορίνη, απέδειξαν ότι από την φωτορύπανση πλήττονται κυρίως οι αστικές και γειτνιάζουσες σε αυτές περιοχές (βλ. Εικόνα 14). Στο Πίνακα 15 δίδεται ο δείκτης SoP για την Σαντορίνη και στο διάγραμμα 43 η αντίστοιχη οπτικοποίησή του. Ο δείκτης αποκαλύπτει την εποχική φύση του φαινομένου που ταυτίζεται με περιόδους έντονης τουριστικής κίνησης (βλ. Εικόνα 15 και διάγραμμα 43).

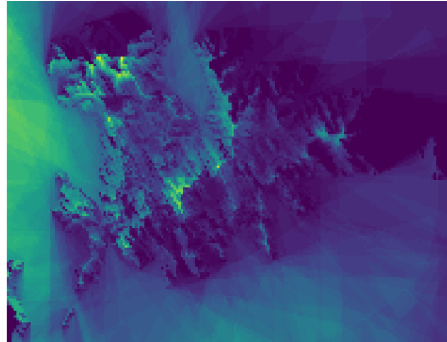
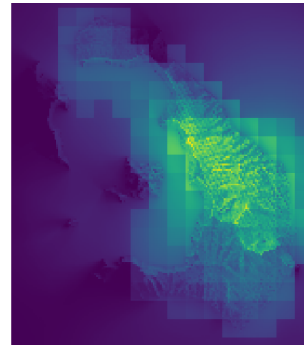
Μειονεκτήματα του δείκτη αποτελεί η αγνόηση της έμμεσης φωτορύπανσης και των καιρικών συνθηκών αλλά και οι απαιτήσεις του σε σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους.

Μήνας	SoP	Μήνας	SoP
Ιανουάριος	83640	Ιούλιος	152768
Φεβρουάριος	87345	Αύγουστος	150257
Μάρτιος	95826	Σεπτέμβριος	144304
Απρίλιος	130298	Οκτώβριος	146255
Μάιος	144866	Νοέμβριος	113537
Ιούνιος	141661	Δεκέμβριος	116939

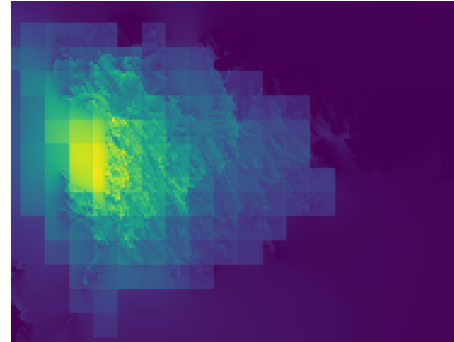
Πίνακας 15: Η διακύμανση του δείκτη φωτορύπανσης (SoP) στην Σαντορίνη το 2017 με δεδομένα VIIRS. (Πηγή: Stathakis et al., 2018).



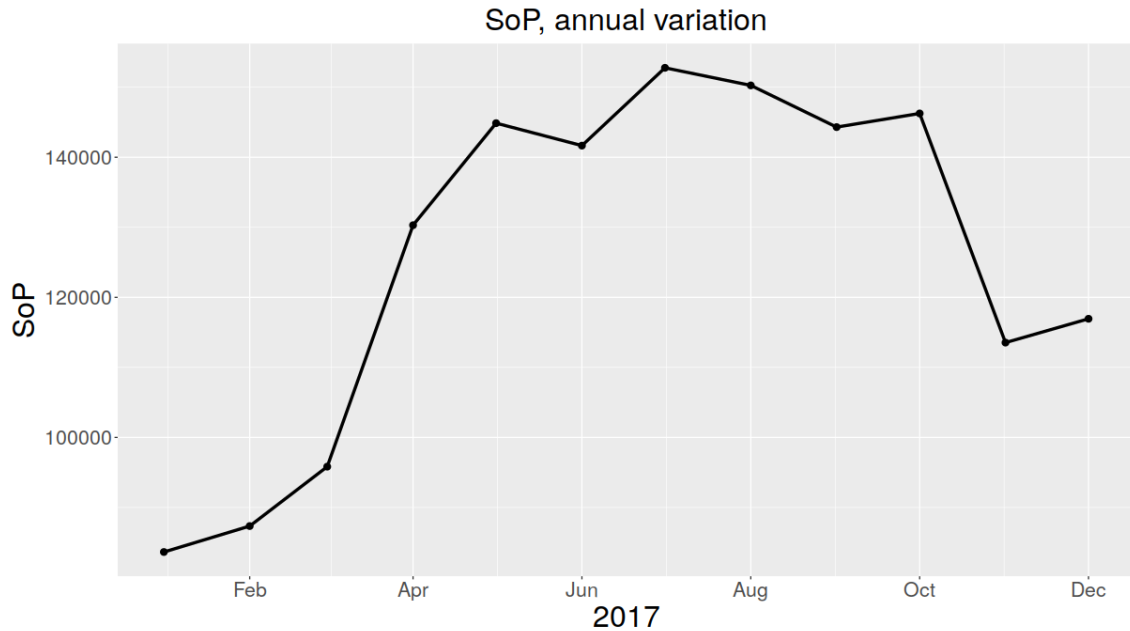
(i) Σαντορίνη, Chalkias et al. 2006, Μέθοδος (PPI)



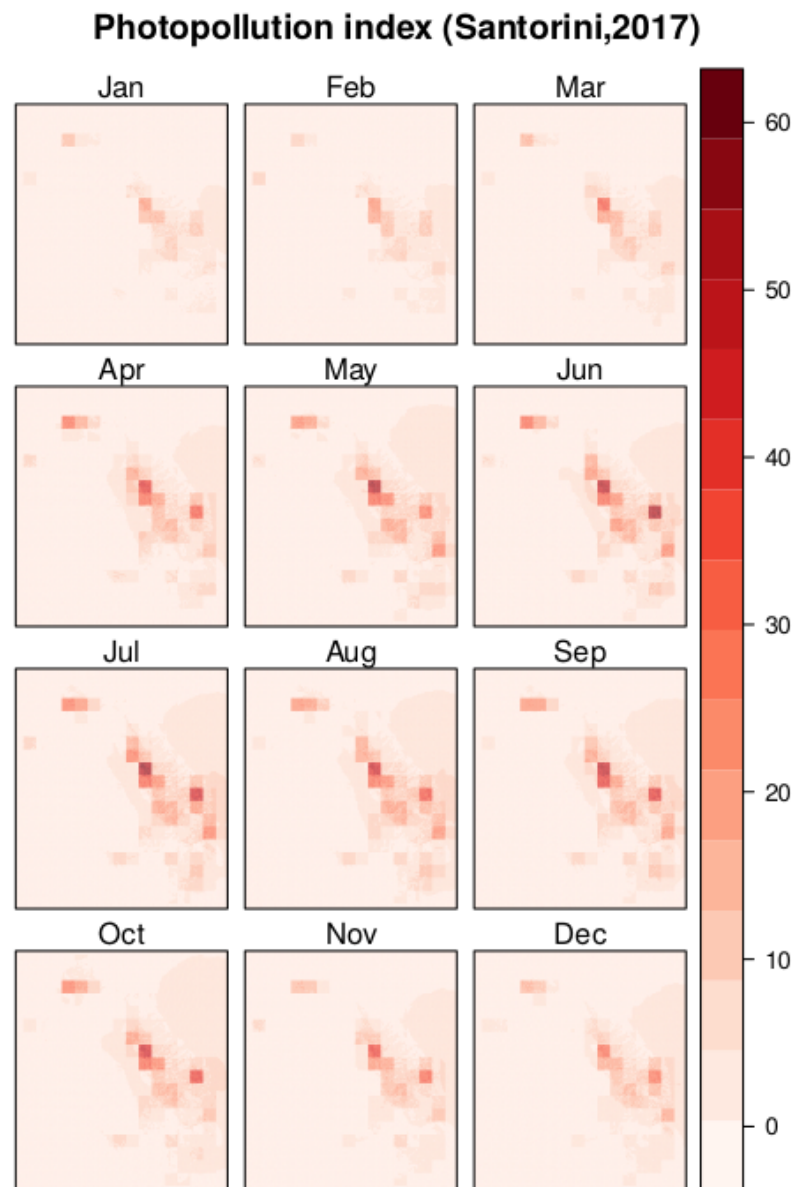
(ii) Μύκονος, Chalkias et al. 2006, Μέθοδος (PPI)



Εικόνα 14: Σύγκριση δύο μεθόδων εκτίμησης φωτορύπανσης, Chalkias et al. 2006 και PPI, στις νήσους Μύκονος και Σαντορίνη. (Πηγή: Stathakis et al., 2018).



Διάγραμμα 43: Δείκτης SoP για την Σαντορίνη το 2017. (Πηγή: Stathakis et al., 2018).



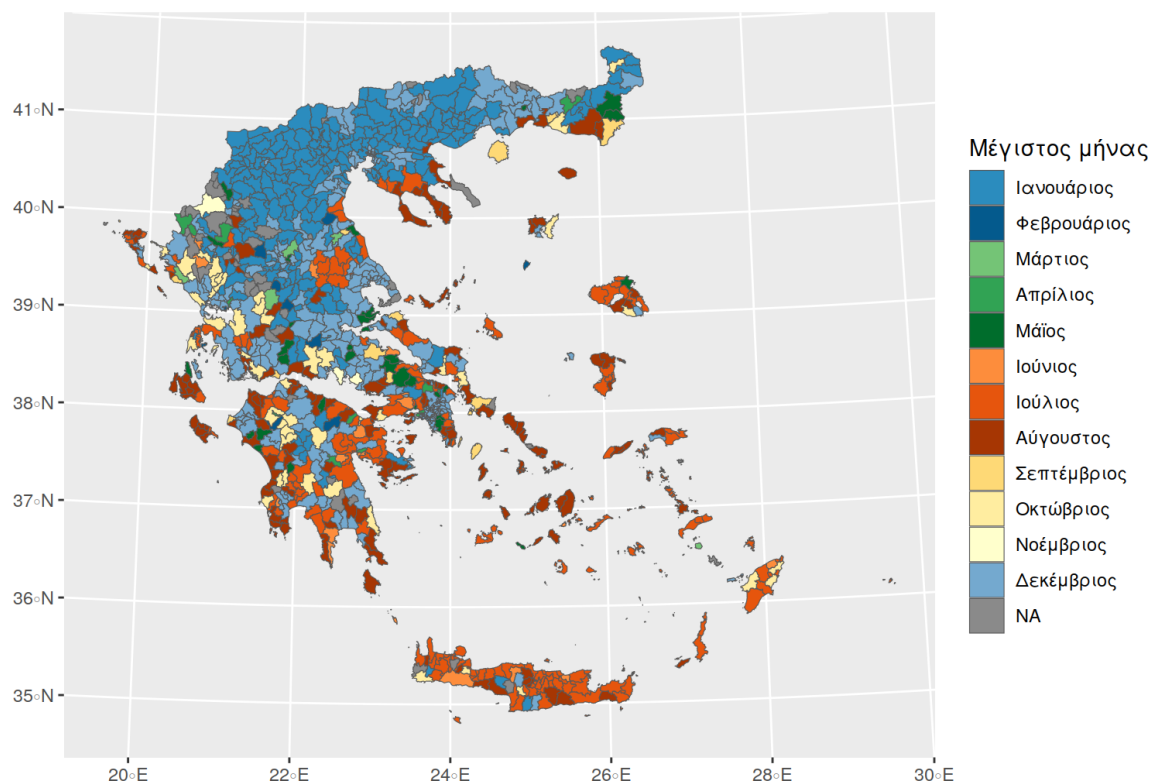
Εικόνα 15: Ετήσια διακύμανση του δείκτη φωτορύπανσης (PPI) στην Σαντορίνη, με βάση την προτεινόμενη μέθοδο και δεδομένα VIIRS 2017. (Πηγή: Stathakis et al., 2018).

#### 4.3.4 ΕΠΟΧΙΚΟΤΗΤΑ, ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΕΠ ΜΕ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΝΥΧΤΕΡΙΝΩΝ ΦΩΤΩΝ

Από τον υπολογισμό του δείκτη εποχικότητας προκύπτει για κάθε δήμο (Καποδιστριακό και Καλλικρατικό) ο μήνας με την μέγιστη τιμή του δείκτη (βλ. χάρτες 15, 16). Και στις δύο περιπτώσεις, παρατηρείται ότι η μέγιστη δραστηριότητα εποχικά και χωρικά διαφοροποιείται στους δήμους της Ελλάδας.

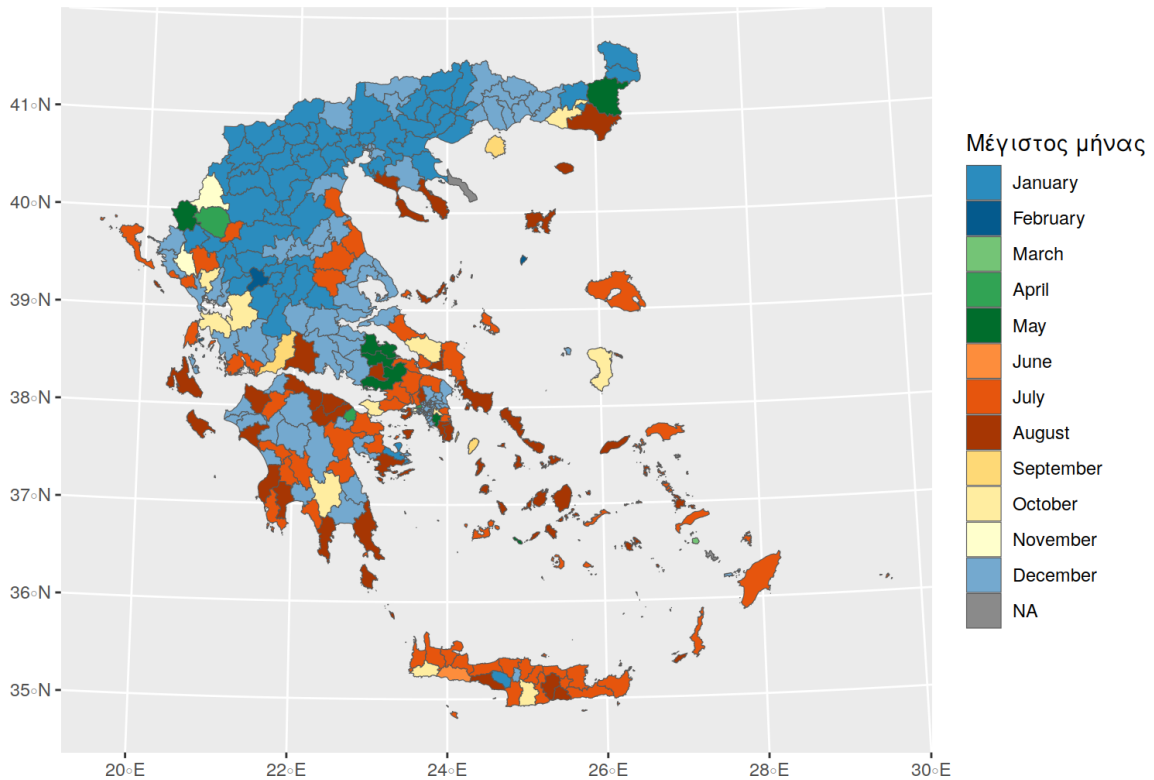
Στην νότια Ελλάδα (κυρίως Πελοπόννησο), στα νησιά και τα παράλια της χώρας, η εποχικότητα της νυχτερινής ακτινοβολίας, και κατά συνέπεια της αστικής κίνησης, εμφανίζει μέγιστα κατά τους θερινούς μήνες, ιδιαίτερα κατά τον Ιούλιο και Αύγουστο. Η διαπίστωση αυτή συνάδει με την γνωστή και τυπική διακύμανση της τουριστικής κίνησης κατά τους μήνες αυτούς σε αυτές τις γεωγραφικές ζώνες.

Αντίθετα, στην βόρεια Ελλάδα και την ηπειρωτική ενδοχώρα τα μέγιστα εντοπίζονται κατά τους χειμερινούς μήνες. Στην βόρεια Ελλάδα παρατηρούνται μέγιστα κατά των Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο νοτιότερα. Ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση δεν πρέπει να αγνοείται η επίδραση των χιονοπτώσεων που παρατηρούνται στις περιοχές αυτές τον χειμώνα, ιδιαίτερα στην Βόρεια Ελλάδα.



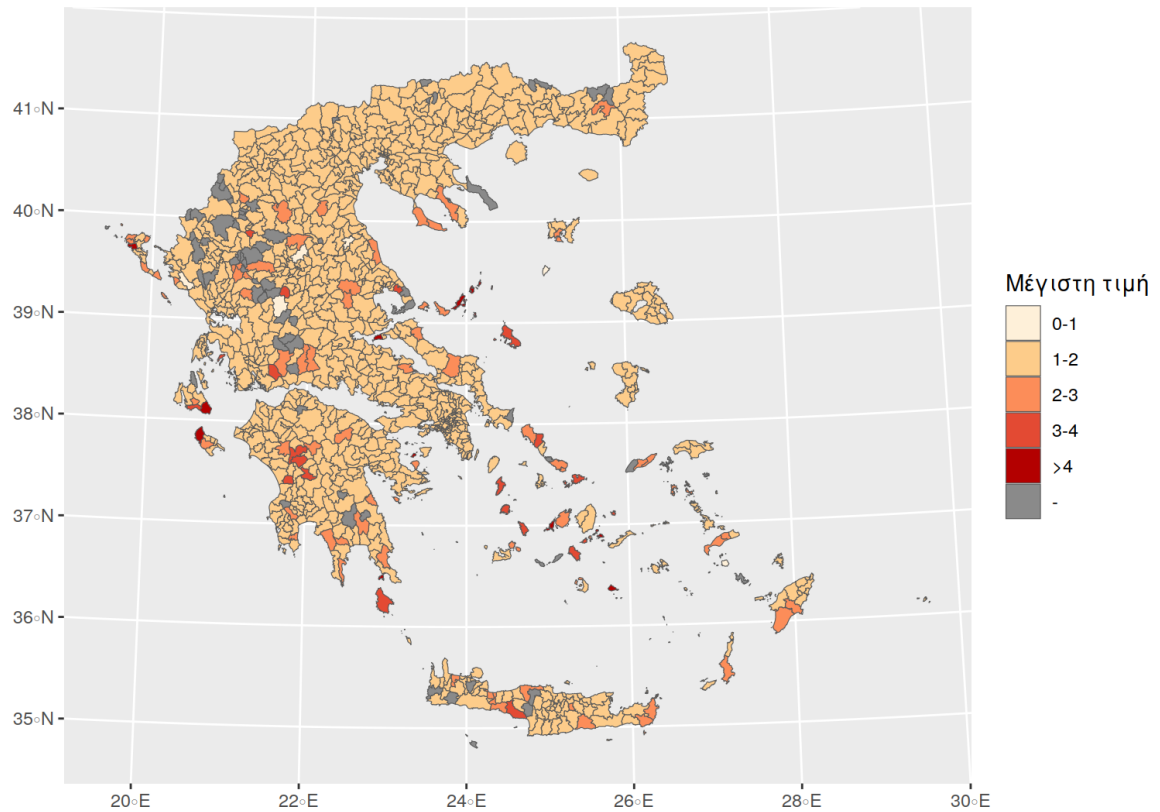
Χάρτης 15: Μήνας με τον μέγιστο δείκτη εποχικότητας, Καποδιστριακοί δήμοι. (Πηγή: ιδία επεξεργασία).



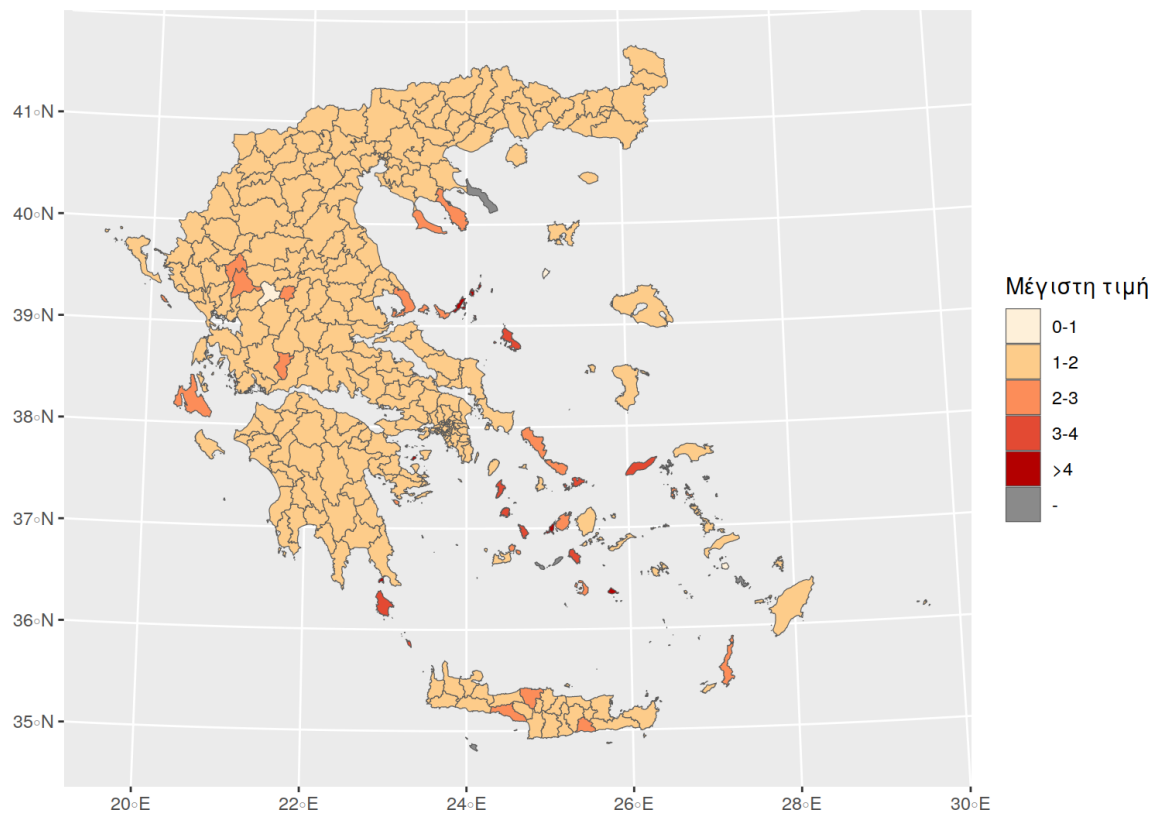


Χάρτης 16: Μήνας με τον μέγιστο δείκτη εποχικότητας, Καλλικρατικοί δήμοι. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Επιπλέον, στους χάρτες 17, 18 παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή του δείκτη εποχικότητας για τον παραπάνω μήνα. Σύμφωνα με τον δείκτη οι τιμές της δραστηριότητας τον μέγιστο μήνα είναι κατά κύριο λόγο 1-2 φορές μεγαλύτερη από τον τυπικό μήνα αναφοράς (συνήθως Μάρτη και ανάλογα τους κανόνες που ορίστηκαν). Δεν λείπουν περιπτώσεις δήμων με ακόμα μεγαλύτερες θετικές αποκλίσεις από τον μήνα αναφοράς κυρίως σε νησιά όπως η Κέρκυρα, η Κρήτη, η Ρόδος, η Ζάκυνθος, η Μύκονος, τα Κύθηρα, η Κως, η Άνδρος κ.α.). Το ίδιο ισχύει και στην Χαλκιδική. Οι αυξημένες τιμές του δείκτη εποχικότητας πάλι θα μπορούσαν να αποδοθούν στην τουριστική κίνηση. Παρόμοιο πρότυπο εμφανίζουν κάποιοι ορεινοί δήμοι στην ηπειρωτική Ελλάδα με τιμή δείκτη 2 ή 3 φορές μεγαλύτερη από την τιμή του μήνα αναφοράς. Όμως η ερμηνεία είναι διαφορετική και θα μπορούσε να αποδοθεί σε ακραίες χιονοπτώσεις κατά τους μήνες αυτούς αλλά και στην αστάθεια που εμφανίζουν χαμηλές τιμές ακτινοβολίας. Συγκριτικά ανάμεσα στις δύο διαφορετικές χωρικές διοικητικές διαρθρώσεις τα προαναφερθέντα χωρικά πρότυπα ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό.



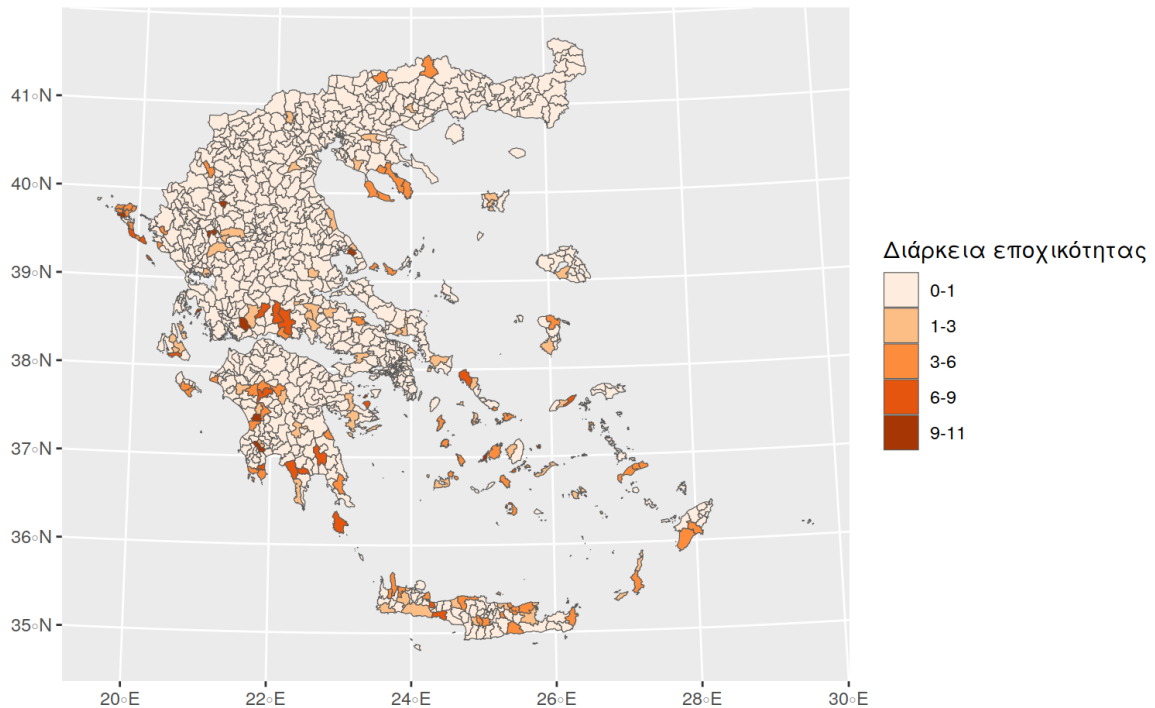
Χάρτης 17: Μέγιστη τιμή δείκτη εποχικότητας, Καποδιστριακοί δήμοι. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



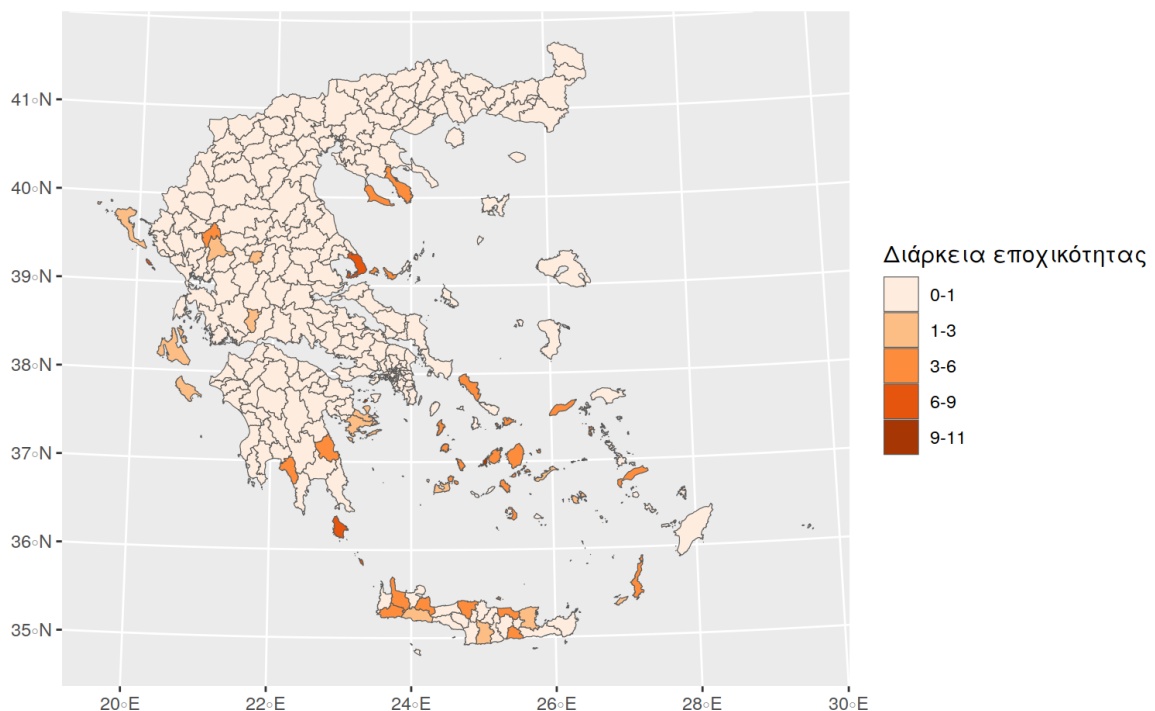
Χάρτης 18: Μέγιστη τιμή δείκτη εποχικότητας, Καλλικρατικοί δήμοι. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Τέλος, στους χάρτες 19 & 20 καταγράφεται η διάρκεια της εποχικότητας, δηλαδή πό-

σοι μήνες παρουσιάζουν δείκτη μεγαλύτερο κατά 1,5 φορές το δείκτη του μήνα αναφοράς. Οι πιο χαρακτηριστικές περιοχές είναι, και στις δύο περιπτώσεις χωρικής διάρθρωσης, τα νησιά του Αιγαίου, η Χαλκιδική και η Κρήτη όπου έχουν συγκριτικά με την υπόλοιπη χώρα, μεγαλύτερη διάρκεια εποχικότητας.

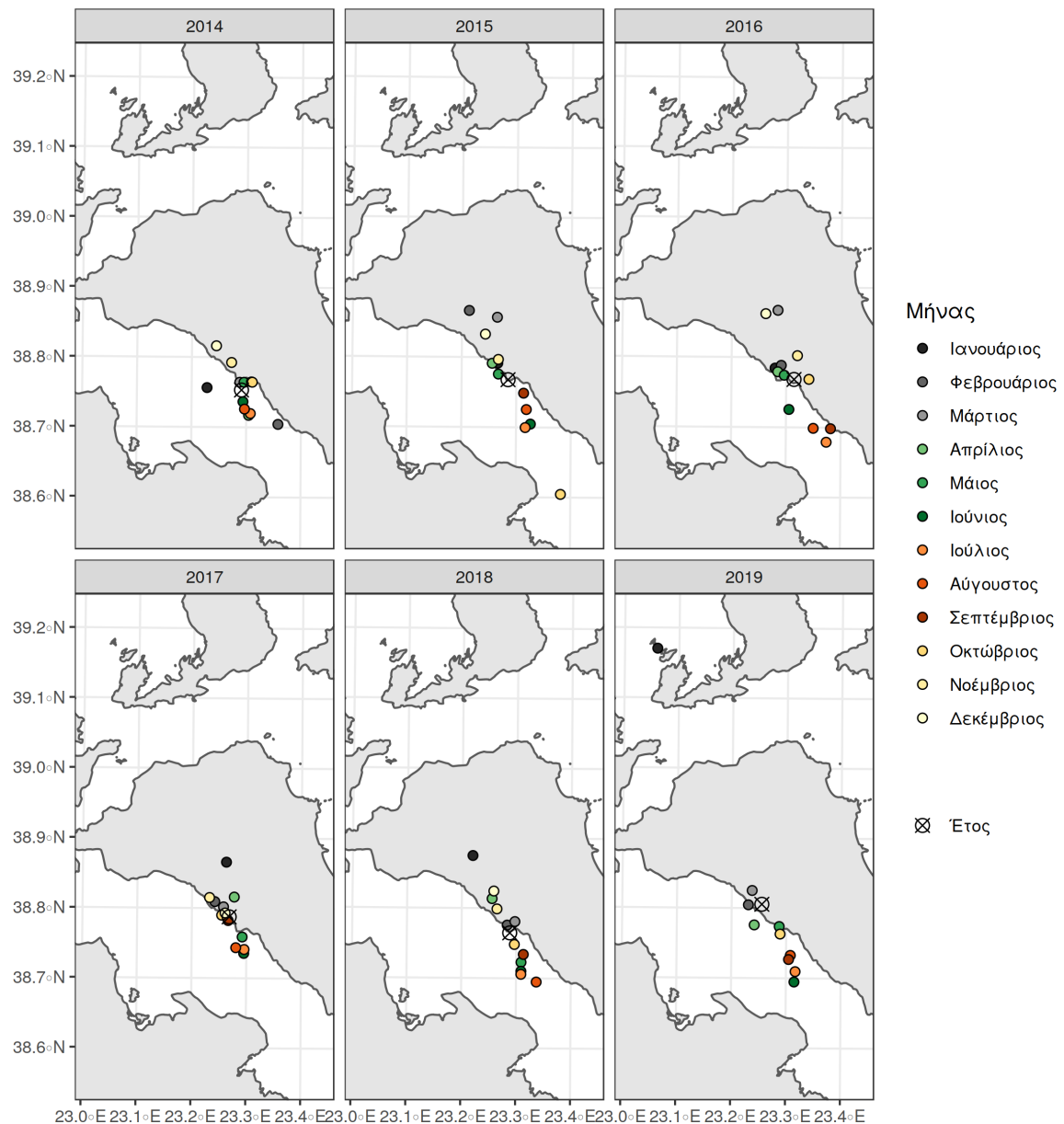


Χάρτης 19: Διάρκεια εποχικότητας, Καποδιστριακοί δήμοι (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



Χάρτης 20: Διάρκεια εποχικότητας, Καλλικρατικοί δήμοι. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Η εποχική και χωρική διακύμανση του δείκτη εποχικότητας και αυτή η κάθετη διαφοροποίηση από Βορρά προς Νότο από τον χειμώνα στο καλοκαίρι αποτυπώνεται στην υποκείμενη αντίστοιχη μεταβολή του σταθμισμένου χωρικού μέσου του νυχτερινού φωτός στον Ελλαδικό χώρο (βλ. Χάρτη 21). Το κέντρο βάρους παλινδρομεί κάθε έτος από τα Β-ΒΔ, κατά τους χειμερινούς μήνες προς τα Ν-ΝΑ κατά τους θερινούς. Η παλινδρόμηση αυτή οφείλεται στην έντονη τουριστική επισκεψιμότητα της νότιας Ελλάδας και των νησιών κατά τους θερινούς μήνες. Από την άλλη το χειμώνα, η έλλειψη αυτής της τουριστικής δραστηριότητας στην Νότια Ελλάδα, σε συνδυασμό με την ενδεχόμενη επίδραση των χιονοπτώσεων στις μετρήσεις ακτινοβολίας, μετατοπίζει το κέντρο βάρους προς τα βόρεια.



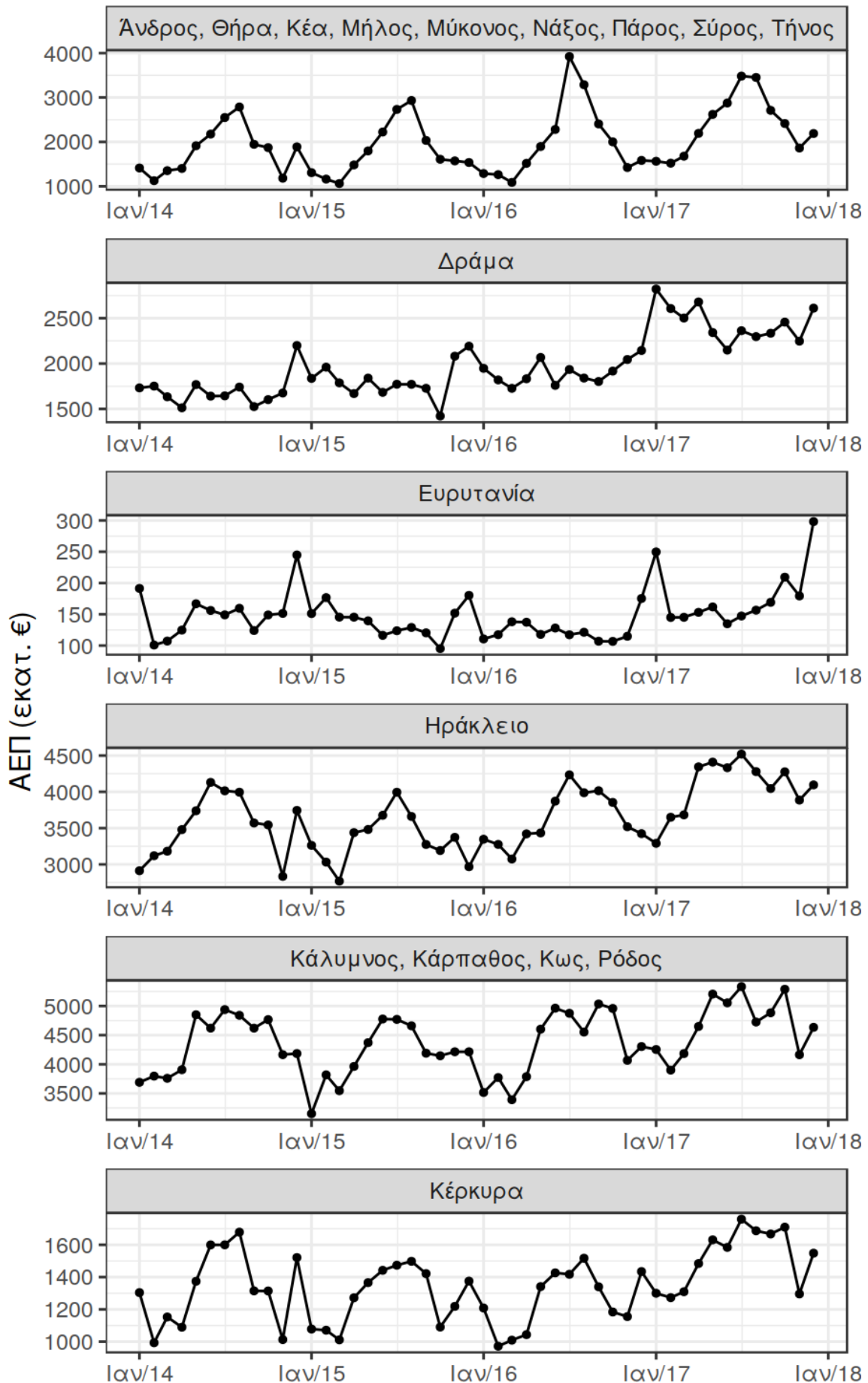
Χάρτης 21: Η μετατόπιση σταθμισμένου χωρικού μέσου της νυχτερινής ακτινοβολίας στον Ελλαδικό χώρο (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Τέλος, με βάση το γραμμικό μοντέλο  $Y = 24,34 + 0,27X$  ( $R^2 = 0,73$ ) που υπολογίστηκε στην ενότητα 3.3.4 έγινε εκτίμηση του ΑΕΠ σε μηνιαία βάση για όλα τα NUTS 3 της Ελλάδας για την περίοδο 2014-2017.

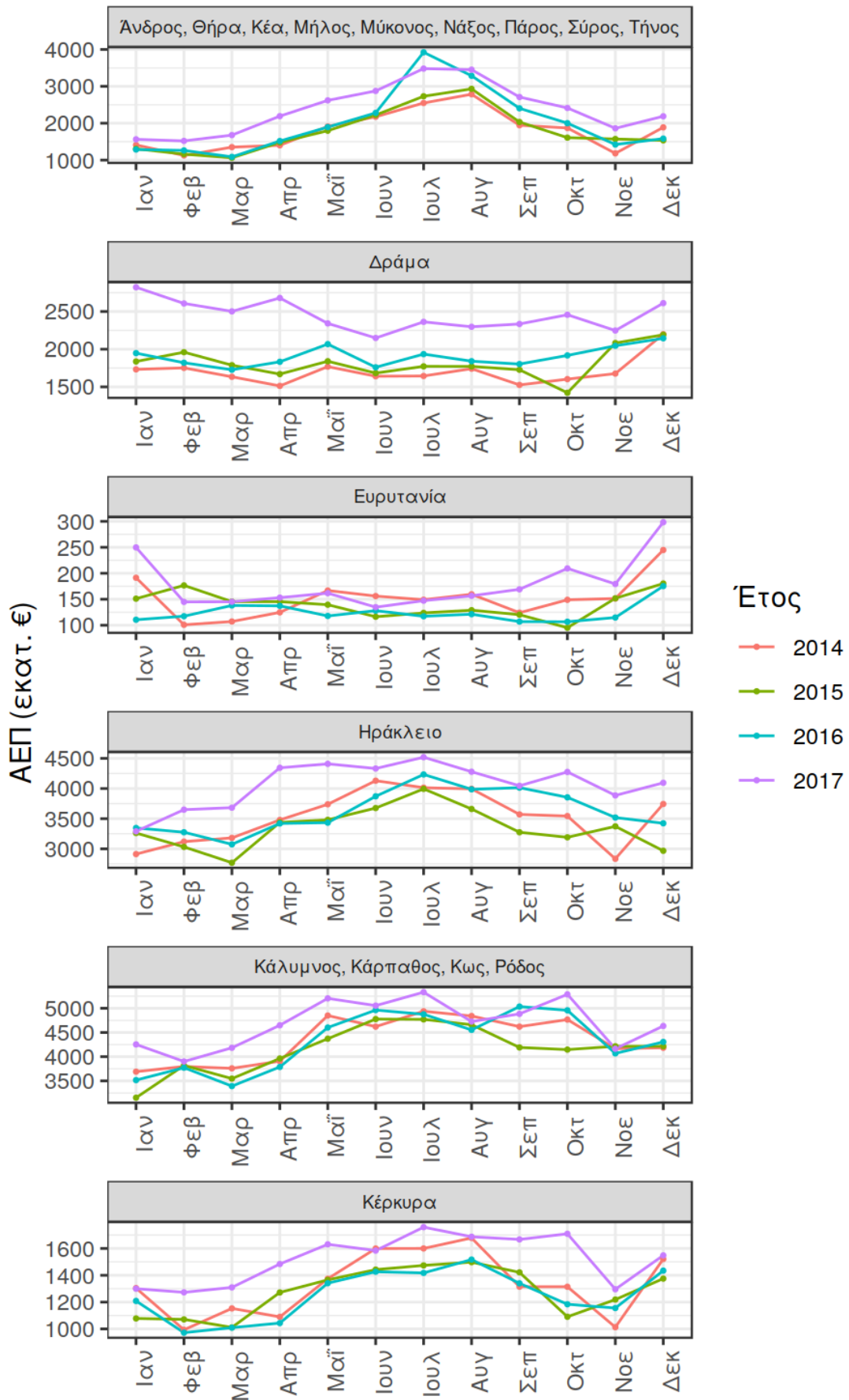
Στο διάγραμμα 44 παρουσιάζεται η εκτίμηση για το μηνιαίο ΑΕΠ για επιλεγμένες στατιστικές μονάδες NUTS 3. Στο διάγραμμα 45 είναι η σύγκριση ανά μήνα για τα ίδια δεδομένα. Η διακύμανση της εκτίμησης του ΑΕΠ συνάδει με τα οικονομικά μοντέλα των περιοχών αυτών. Έτσι, σε νησιωτικές, τουριστικές περιοχές (νησιά των Κυκλάδων, Ηράκλειο, νησιά των Δωδεκανήσων, Κέρκυρα) με έντονη οικονομική δραστηριότητα τους θερινούς μήνες είναι χαρακτηριστικά τα μέγιστα που εκτιμήθηκαν σε αυτές τις περιό-

δους. Επιπλέον, στην Κέρκυρα παρατηρείται διαχρονικά μια αύξηση του ΑΕΠ κατά τον Δεκέμβριο, ενδεικτικό των τοπικών εορτών και της επισκεψιμότητας στο νησί κατά τον μήνα αυτό.

Από την άλλη περιοχές με διαφορετική οικονομική εξειδίκευση, όπως η Ευρυτανία και η Δράμα παρουσιάζουν αντίστροφα χαρακτηριστικά δηλαδή το ΑΕΠ αυξάνεται κατά τους χειμερινούς μήνες σε σχέση με το υπόλοιπο έτος. Οι παραπάνω παρατηρήσεις ταυτίζονται με τα καθιερωμένα και γνωστά χωρικά πρότυπα της κατανομής της τουριστικής δραστηριότητας στον Ελλαδικό χώρο. Κατά συνέπεια διαπιστώνεται ότι τα νυχτερινά φώτα, μέσω της υψηλής συσχέτισης τους με οικονομικές μεταβλητές, όπως το ΑΕΠ, αποτελούν μια εναλλακτική πρόταση για την εκτίμηση σχετικών στατιστικών μεγεθών σε βραχύτερα χρονικά βήματα από αυτά των προκαθορισμένων και επίσημων απογραφών.



Διάγραμμα 44: Μηνιαίο ΑΕΠ για επιλεγμένα NUTS 3 για τα έτη 2014-2017. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



Διάγραμμα 45: Σύγκριση μηνιαίου ΑΕΠ για επιλεγμένα NUTS 3 για τα έτη 2014-2017. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

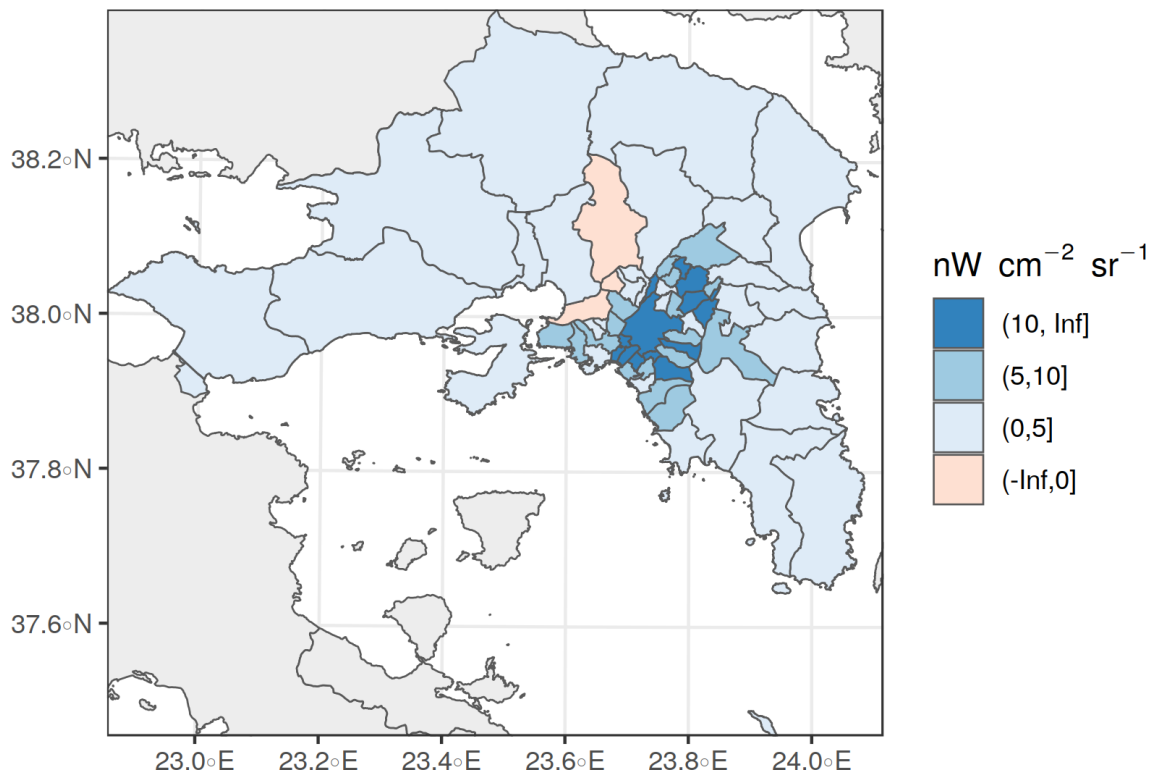


#### 4.3.5 ΧΩΡΙΚΑ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ

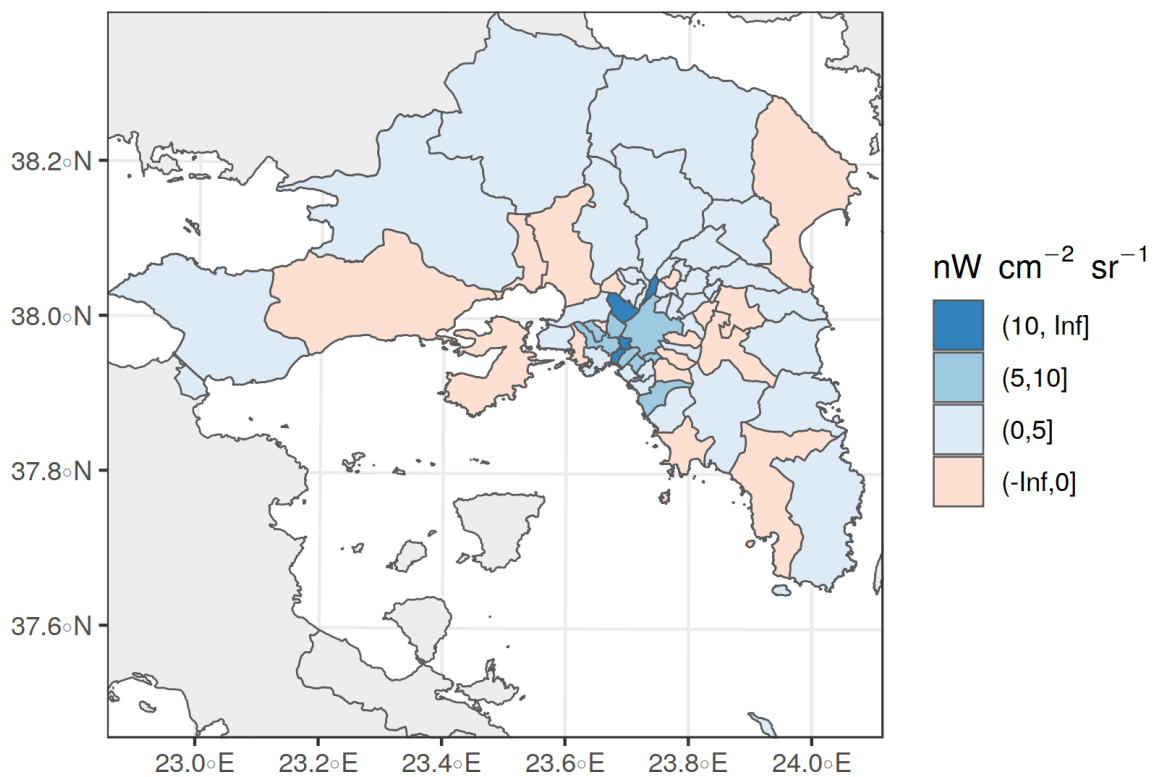
Ο δείκτης  $\Delta 1$  αποτυπώνει χωρικά, με όρους ακτινοβολίας νυχτερινών φώτων, ποίοι δήμοι είχαν εντονότερη (ή ασθενέστερη) αστική δραστηριότητα τον Αύγουστο έναντι του Μαρτίου. Όταν  $\Delta 1_i < 0$  τότε αυτό σημαίνει ότι ο δήμος  $i$  είχε εντονότερη αστική δραστηριότητα τον Αύγουστο από τον Μάρτιο. Από την υπόθεση εργασίας είναι δεδομένη η συσχέτιση και συμμεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας νυχτερινών φώτων με τον πληθυσμό. Κατά συνέπεια, η εντονότερη μέση ακτινοβολία νυχτερινών φώτων τον Αύγουστο είναι αποτέλεσμα αυξημένου πληθυσμού στον δήμο έναντι του Μάρτη.

Στους χάρτες 22 & 23, αποδίδεται χωρικά αυτή η διαφοροποίηση για τους καλλικρατικούς δήμους της Αττικής το 2019 και 2020. Όπως προκύπτει, τα χωρικά πρότυπα κατανομής του πληθυσμού είναι διαφορετικά ανάμεσα στα δύο έτη. Το 2019 παρατηρούμε ότι σταθερά ο Μάρτιος έχει περισσότερο πληθυσμό από τον Αύγουστο στην πλειοψηφία των δήμων. Μάλιστα στους δήμους του κέντρου αυτή η πληθυσμιακή υπέρσχυση του Μαρτίου είναι πιο εμφανής, γεγονός που υποδηλώνει ότι υπάρχει σημαντικότερη απώλεια πληθυσμού τον Αύγουστο στους δήμους αυτούς σε σχέση με την αντίστοιχη απώλεια στους περιφερειακούς δήμους.

Το 2020 το χωρικά πρότυπα κατανομής και μετακίνησης του πληθυσμού είναι πιο διαφοροποιημένα. Η πιο σημαντική μεταβολή που επήλθε, πιθανόν ως αποτέλεσμα του γενικού απαγορευτικού που επιβλήθηκε το 2020, είναι η πληθυσμιακή ενίσχυση περιφερειακών δήμων τον Αύγουστο σε βαθμό τέτοιο που να ξεπερνά τον πληθυσμό του Μαρτίου. Προφανώς η απώλεια πληθυσμού που παρατηρείται στους κεντρικούς δήμους της Αττικής, το 2020 δεν συνέβη μόνο με μετακίνηση πληθυσμού προς προορισμούς εκτός Αττικής (πχ νησιά Αιγαίου) αλλά εν μέρη και με αξιόλογη μετακίνηση πληθυσμού προς περιφερειακούς δήμους β' κατοικίας εντός της Αττικής. Επίσης στους κεντρικούς δήμους για το 2020 φαίνεται ότι η απώλεια πληθυσμού τον Αύγουστο σε σχέση με τον Μάρτιο μετριάζεται ως αποτέλεσμα των συνεπειών της πανδημίας. Ουσιαστικά από την οπτικοποίηση του δείκτη  $\Delta 1$  διαφαίνεται ότι η πανδημία και το επιβαλλόμενο απαγορευτικό επηρέασαν τα πρότυπα χωρικής κατανομής και μετακίνησης με αποτέλεσμα η έξοδος από τους κεντρικούς δήμους να μετριάζεται αλλά και να κατευθύνεται εντός των ορίων της Αττικής.



Χάρτης 22: Η διαφορά νυχτερινής ακτινοβολίας Μαρτίου-Αυγούστου 2019 στους δήμους της Αττικής. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



Χάρτης 23: Η διαφορά νυχτερινής ακτινοβολίας Μαρτίου-Αυγούστου 2020 στους δήμους της Αττικής. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Ο δείκτης χωροθέτησης ( $LQ$ ) επιτρέπει την σύγκριση της μεταβολής ανάμεσα στους

δήμους με αναφορά στα μεγέθη της περιφέρειας. Πιο συγκεκριμένα,

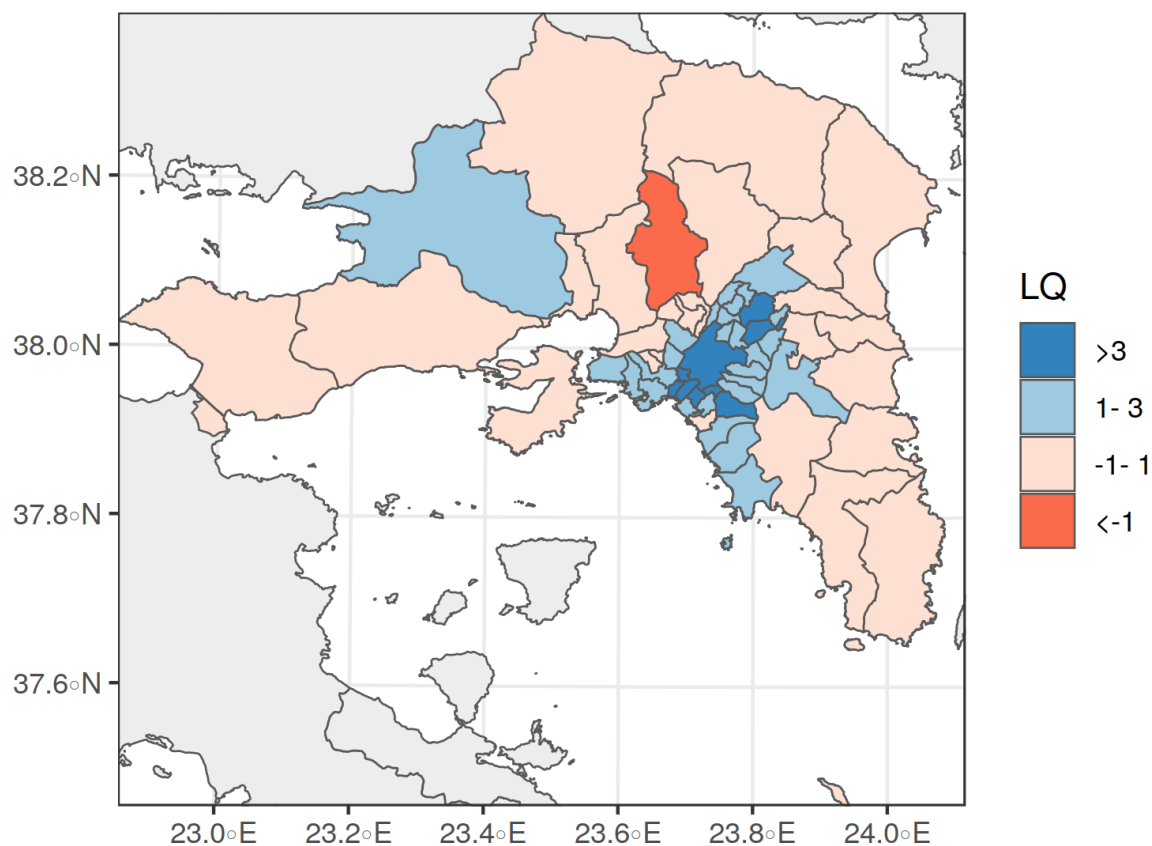
όταν  $LQ1 > 1$  τότε η διαφορά πληθυσμού Μαρτίου-Αυγούστου είναι μεγαλύτερη στον δήμο απ' ό τι στο σύνολο της περιφέρειας.

όταν  $LQ1 < 1$  η διαφορά πληθυσμού Μαρτίου-Αυγούστου είναι μικρότερη στον δήμο απ' ό τι στο σύνολο της περιφέρειας.

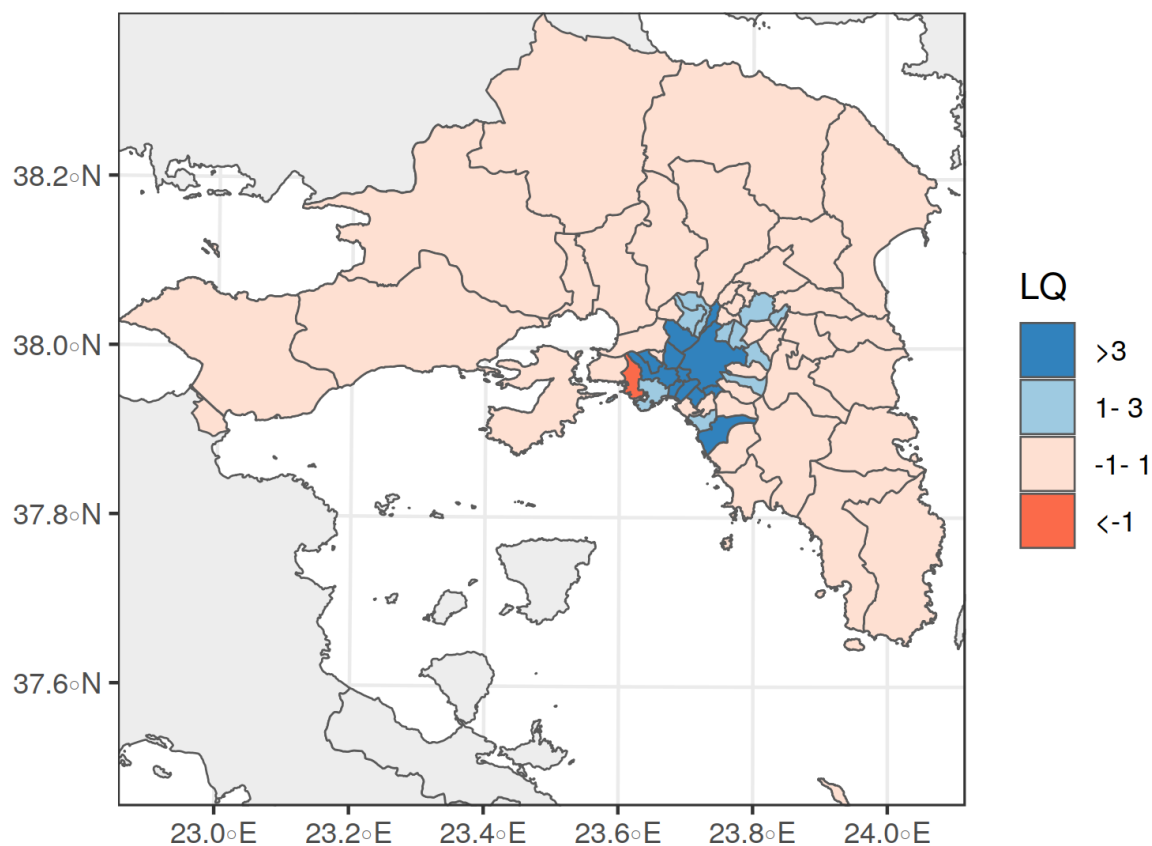
ενώ όταν  $LQ1 = 1$ , τότε η διαφορά στον δήμο είναι ίδια με το σύνολο της περιφέρειας.

Όπως προκύπτει από τον Χάρτη 24 για το 2019 στους κεντρικούς δήμους της Αθήνας, η διαφορά πληθυσμού μεταξύ Μαρτίου-Αυγούστου είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη διαφορά του συνόλου της περιφέρειας ( $LQ1 > 1$ ). Αυτό σημαίνει, λαμβάνοντας υπόψη και τον δείκτη  $\Delta 1$ , ό τι το κέντρο είχε μεγαλύτερες απώλειες πληθυσμού τον Αύγουστο συγκριτικά με τη περιφέρεια.

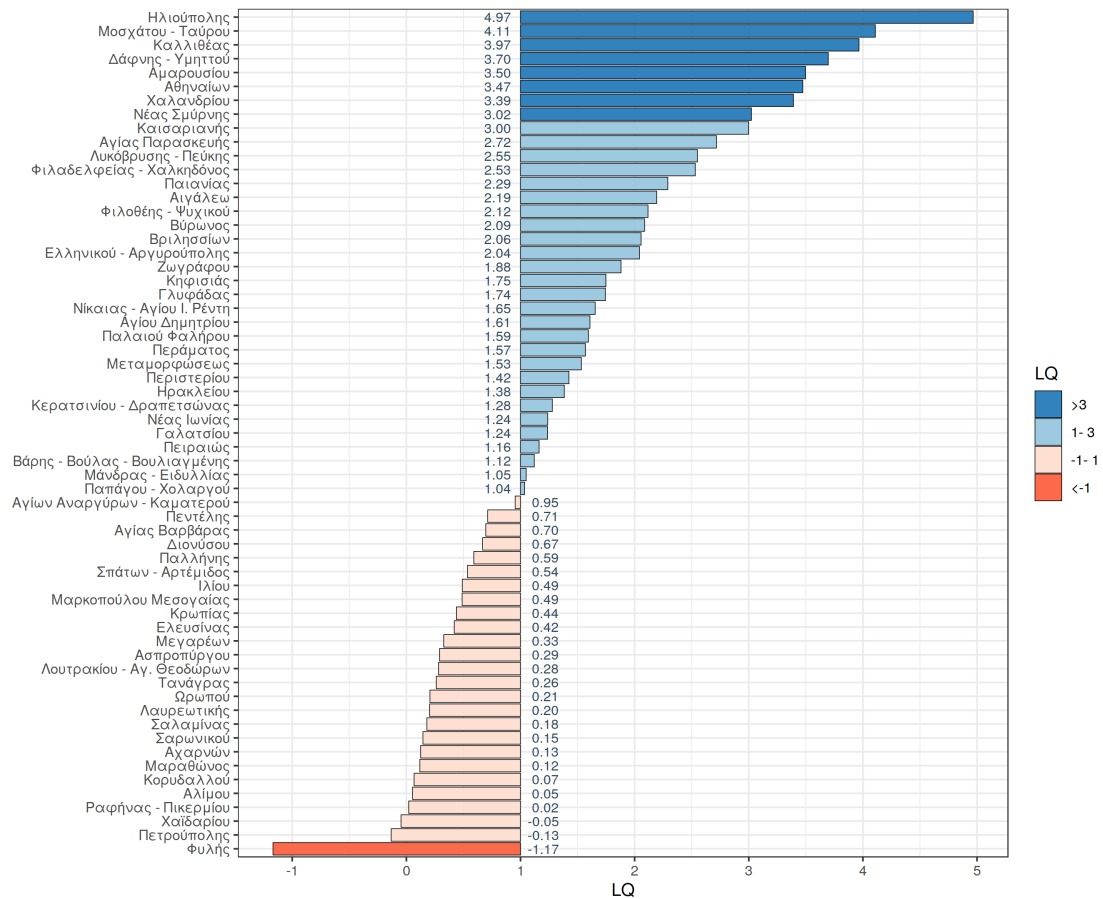
Αυτή η τάση μετριάζεται χωρικά και εστιάζεται ακόμα πιο κεντρικά το 2020 (βλ. Χάρτη 25). Έτσι ενώ το 2019, 36 δήμοι είχαν  $LQ1 > 1$ , το 2020 οι αντίστοιχοι δήμοι είναι σχεδόν οι μισοί (20) (βλ. διαγράμματα 46 & 47). Όμως, το 2020 μπορεί το φαινόμενο να περιορίζεται χωρικά, από την άλλη η διαφοροποίηση από τα μεγέθη της περιφέρειας εντείνεται. Ενώ οι δήμοι με  $LQ1 > 3$ , δηλαδή με έντονη απόκλιση από την αντίστοιχη μεταβολή της περιφέρειας το 2019 ήταν 8, το 2020 έγιναν σε αναλογικά και απόλυτα μεγέθη περισσότεροι (11 δήμοι).



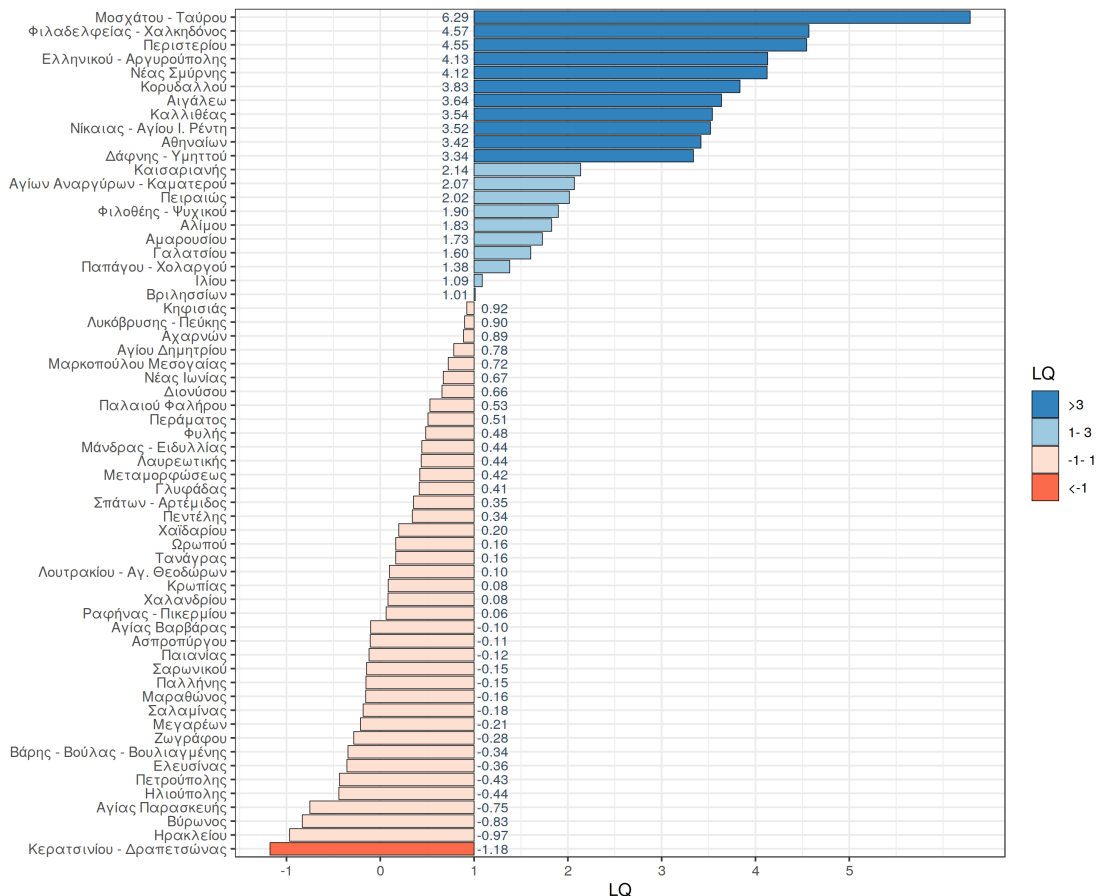
Χάρτης 24: Ο δείκτης χωροθέτησης (LQ) για την διαφορά νυχτερινής ακτινοβολίας Μαρτίου-Αυγούστου 2019 στους δήμους της Αττικής. (Πηγή: ιδία επεξεργασία).



Χάρτης 25: Ο δείκτης χωροθέτησης (LQ) για την διαφορά νυχτερινής ακτινοβολίας Μαρτίου-Αυγούστου 2020 στους δήμους της Αττικής. (Πηγή: ιδία επεξεργασία).



Διάγραμμα 46: Ραβδόγραμμα του δείκτη χωροθέτησης (LQ1) για την διαφορά νυχτερινής ακτινοβολίας Μαρτίου-Αυγούστου 2019 στους δήμους της Αττικής. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



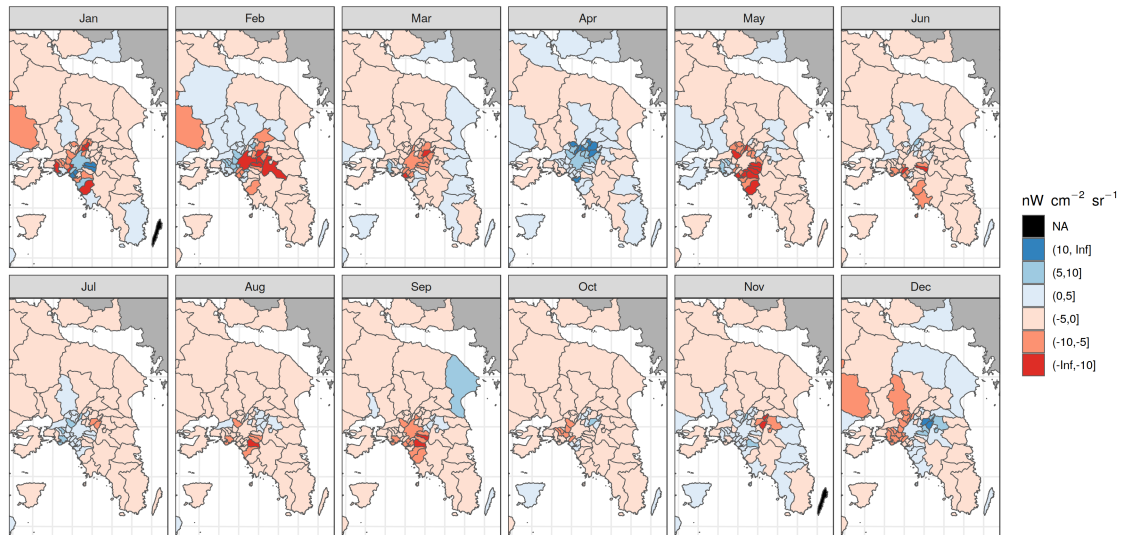
Διάγραμμα 47: Ραβδόγραμμα του δείκτη χωροθέτησης (LQ1) για την διαφορά νυχτερινής ακτινοβολίας Μαρτίου-Αυγούστου 2020 στους δήμους της Αττικής. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Η διαφοροποίηση της αστικής δραστηριότητας και της χωρικής κατανομής ανάμεσα σε καθημερινές και σαββατοκύριακα παρουσιάζεται, μέσω των δεικτών Δ2 και LQ2, στους χάρτες 26 και 27. Στον Χάρτη 26i παρατηρείται ότι κατά τον Απρίλιο, τον Ιούλιο, τον Νοέμβριο και τον Δεκέμβριο του 2019 η αστική δραστηριότητα στους δήμους του κέντρου είναι πιο σημαντική τις καθημερινές απ' ότι τα σαββατοκύριακα. Με εξαίρεση τον Ιούλιο, από τον Μάιο μέχρι και τον Οκτώβριο η ένταση της αστικής δραστηριότητας είναι πιο έντονη τα σαββατοκύριακα, ενδεχομένως λόγω τουριστικής επισκεψιμότητας. Επίσης, στους δήμους της ανατολικής Αττικής, όπου εντοπίζονται περιοχές β' κατοικίας, η αστική δραστηριότητα υπερσχύει τα σαββατοκύριακα έναντι των καθημερινών (πλην ελαχίστων εξαιρέσεων). Κατά το 2020 (Χάρτης 26ii) η αστική δραστηριότητα στο κέντρο φαίνεται πιο ενισχυμένη τις καθημερινές ημέρες έναντι των σαββατοκύριακων, σε σχέση με το 2019.

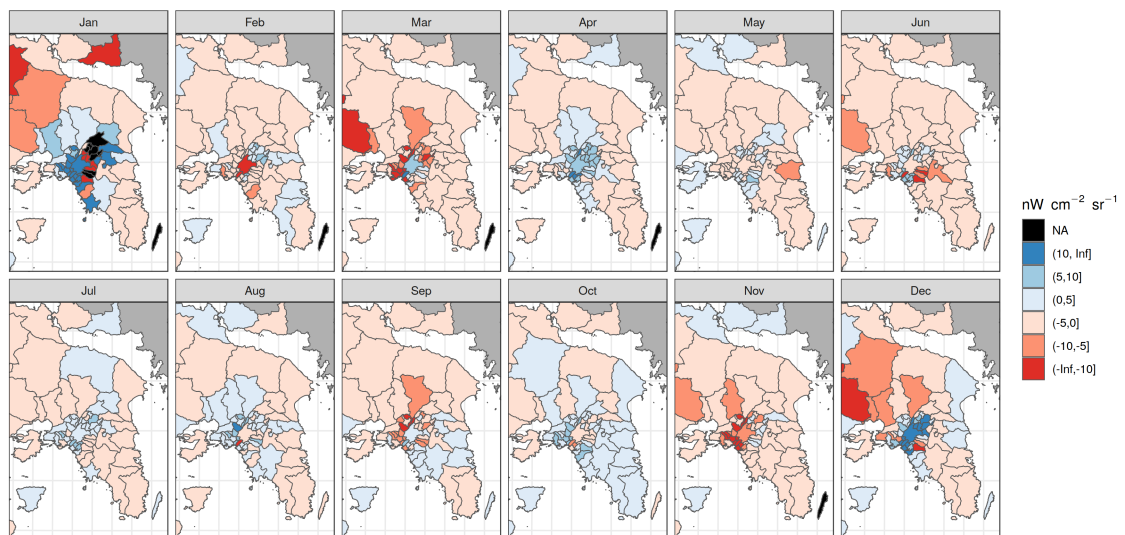
Πιο περιγραφικός είναι ο δείκτης LQ2, ο οποίος, όπως και ο δείκτης LQ1, αποδίδει την εικόνα στους δήμους συγκριτικά με τα μεγέθη της περιφέρειας. Το βασικό χαρακτηρι-

στικό που παρατηρείται ταυτόχρονα και στα δύο έτη, 2019 και 2020 είναι ότι ο Απρίλιος, μήνας που εορτάζεται το Πάσχα, στο κέντρο η αστική δραστηριότητα είναι ενισχυμένη τις καθημερινές ενώ στους περιφερειακούς δήμους τα σαββατοκύριακα. Αυτή η χωρική διαφοροποίηση είναι πιο ακραία αυτόν τον μήνα συγκριτικά με τους υπόλοιπους μήνες (πολύ υψηλός ή χαμηλός δείκτης  $LQ2$ ). Η πόλωση αυτή εντείνεται, τόσο χωρικά (βλ. Χάρτη 27) όσο και ως προς την ένταση (βλ. διάγραμμα 48), το 2020, πολύ πιθανόν ως αποτέλεσμα των περιοριστικών μέτρων που επιβλήθηκαν λόγω της πανδημίας της COVID-19. Ο δείκτης  $LQ2$  για τα δύο έτη δείχνει ότι η αστική δραστηριότητα στους κεντρικούς δήμους, στην πλειοψηφία τους, είναι πιο ενισχυμένη τις καθημερινές έναντι των σαββατοκύριακων. Άλλη μια ιδιαιτερότητα που εντοπίζεται το 2020 σε σχέση με το 2019 είναι ότι τον Ιούλιο και τον Αύγουστο (αλλά και τον Δεκέμβριο) σε αρκετούς δήμους στο κέντρο της Αττικής η αστική δραστηριότητα είναι πιο σημαντική τα σαββατοκύριακα έναντι των καθημερινών. Τάση η οποία δεν παρατηρείται το 2019, ένα τυπικό έτος προ πανδημίας.



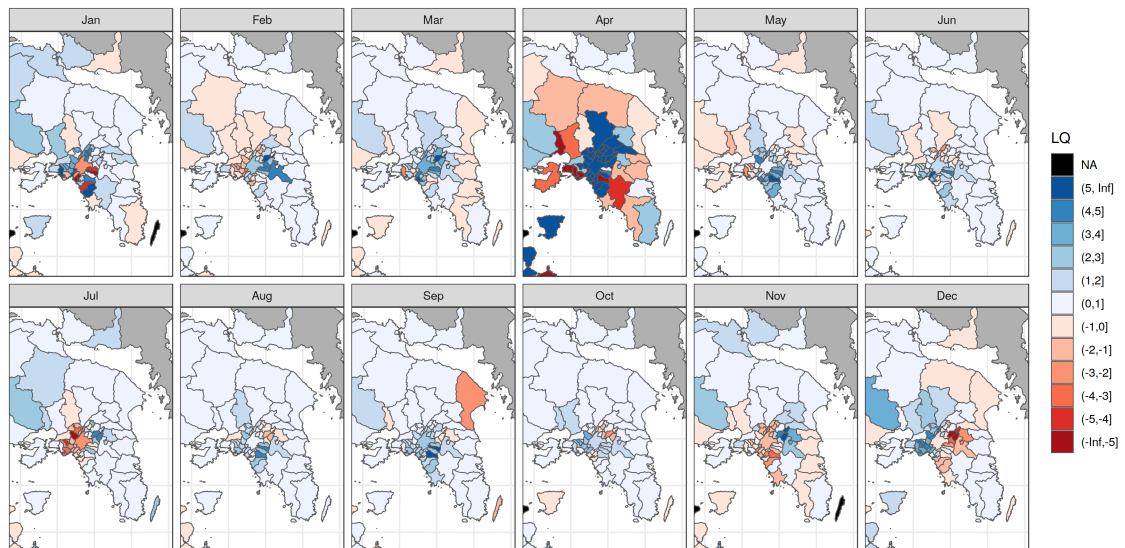


(i) Έτος:2019

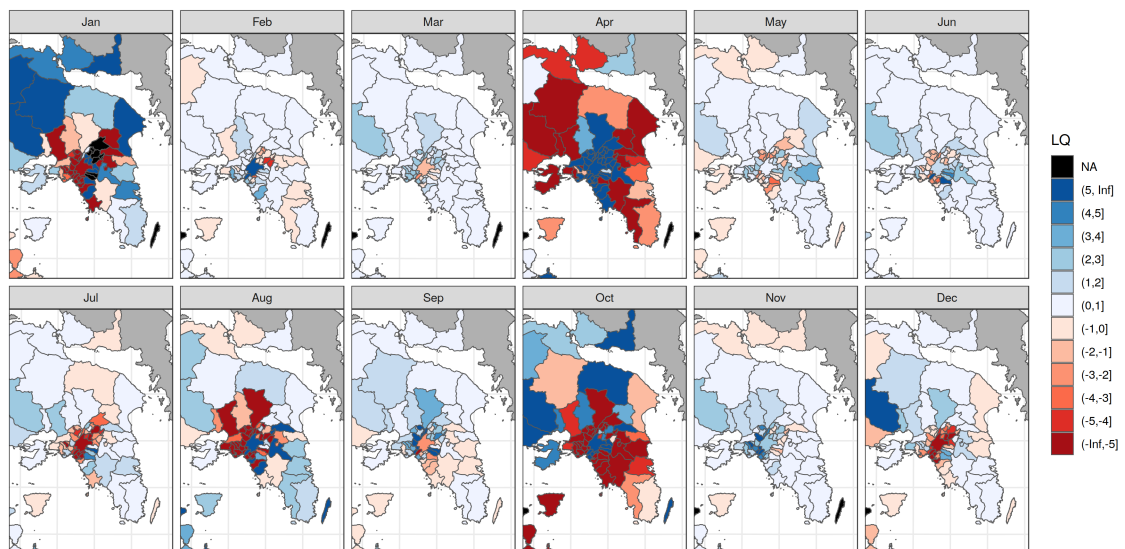


(ii) Έτος:2020

Χάρτης 26: Η διαφορά ( $\Delta 2$ ) νυχτερινής ακτινοβολίας καθημερινών-ΣΚ ανά μήνα στους δήμους της Αττικής, για τα έτη i) 2019 και ii) 2020. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

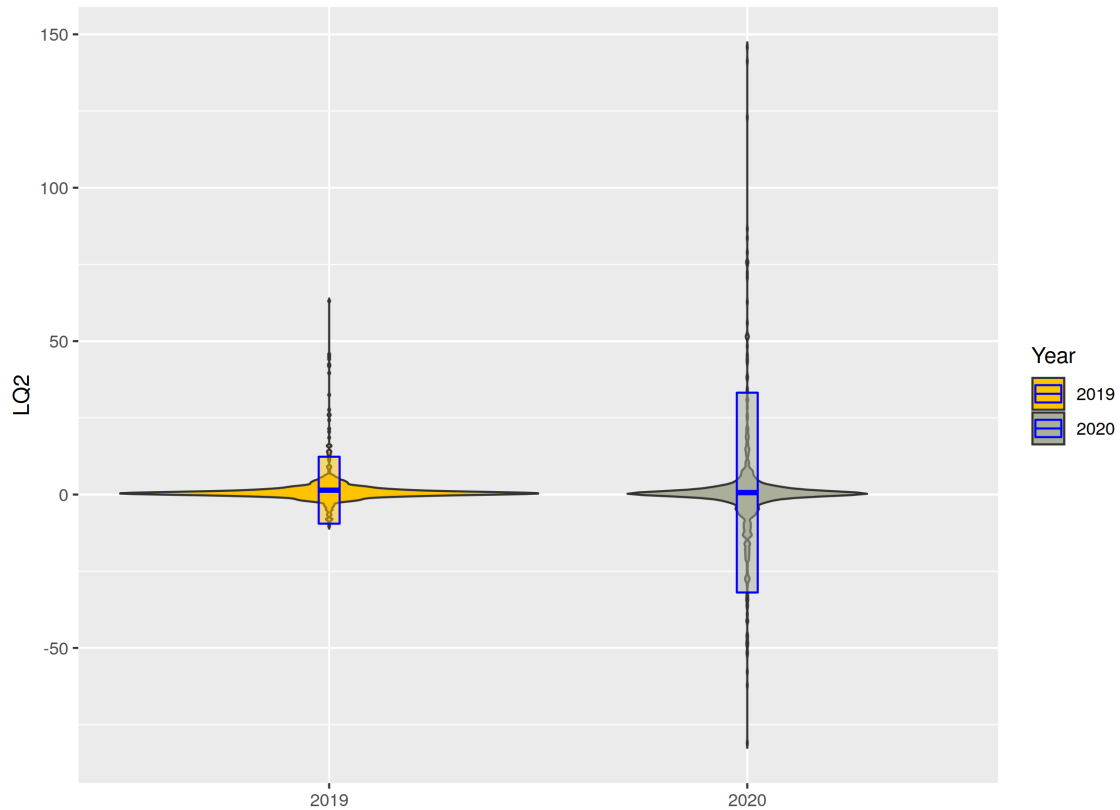


(i) Έτος:2019



(ii) Έτος:2020

Χάρτης 27: Ο δείκτης χωροθέτησης (LQ2) για την διαφορά νυχτερινής ακτινοβολίας καθημερινών-ΣΚ ανά μήνα στους δήμους της Αττικής, για τα έτη i) 2019 και ii) 2020. (Πηγή ίδια επεξεργασία).

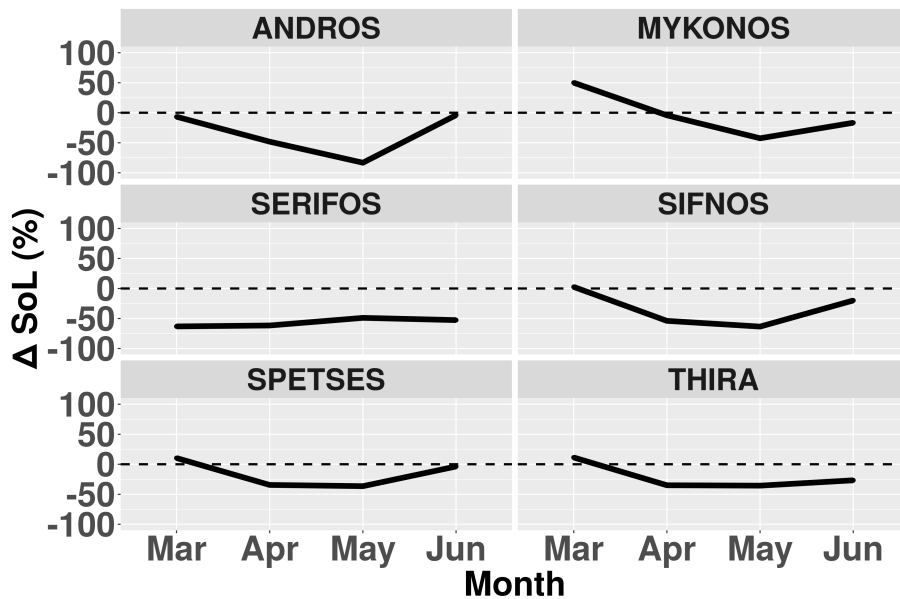


Διάγραμμα 48: Διάγραμμα σε σχήμα βιολιού (violin plot) για τον δείκτη LQ2 τα έτη 2019,2020. Στο μπλε πλαίσιο αποδίδονται ο μέσος όρος και το εύρος μιας τυπικής απόκλισης. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

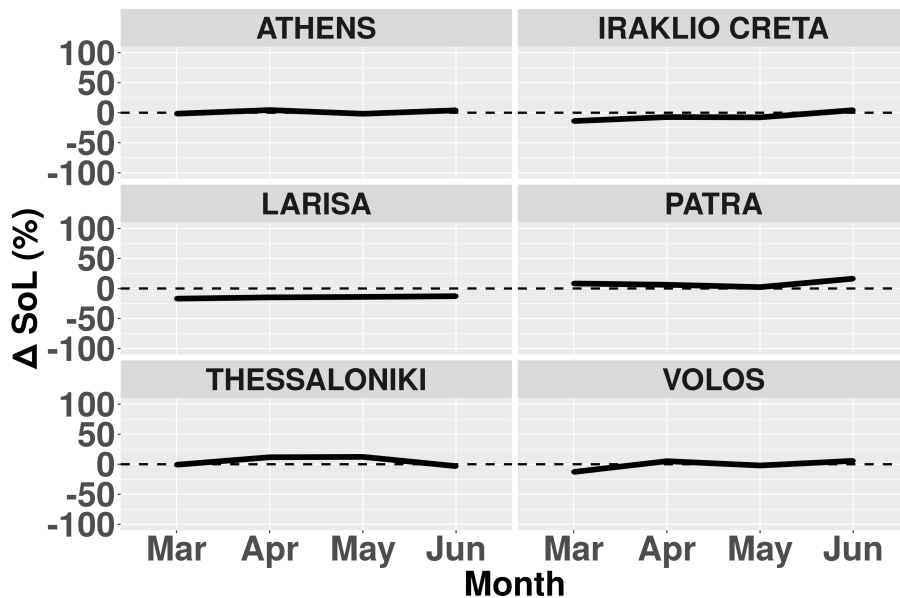
#### 4.3.6 ΕΚΤΑΚΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΝΥΧΤΕΡΙΝΑ ΦΩΤΑ

Ο δείκτης απόκλισης από την κανονικότητα ( $\Delta$ ) αποδόθηκε σε γράφημα μαζί με τον πληθυσμό του κάθε δήμου και το ποσοστό των απασχολούμενων στον ξενοδοχειακό κλάδο που είναι δείκτης της τουριστικής εξειδίκευσης του κάθε δήμου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα 49i, νησιωτικοί δήμοι με εξειδίκευση στον εποχιακό τουρισμό (Μύκονος, Σαντορίνη, Σίφνος, Άνδρος κτλ) πλήττονται σε μεγάλο βαθμό από την επιβολή του lockdown. Από την άλλη, δήμοι με μεγάλα αστικά κέντρα (>150 χιλ. κατοίκους) πλήττονται συγκριτικά σε μικρότερο βαθμό (βλ. διάγραμμα 49ii)



(i) Δείγμα νησιωτικών τουριστικών δήμων

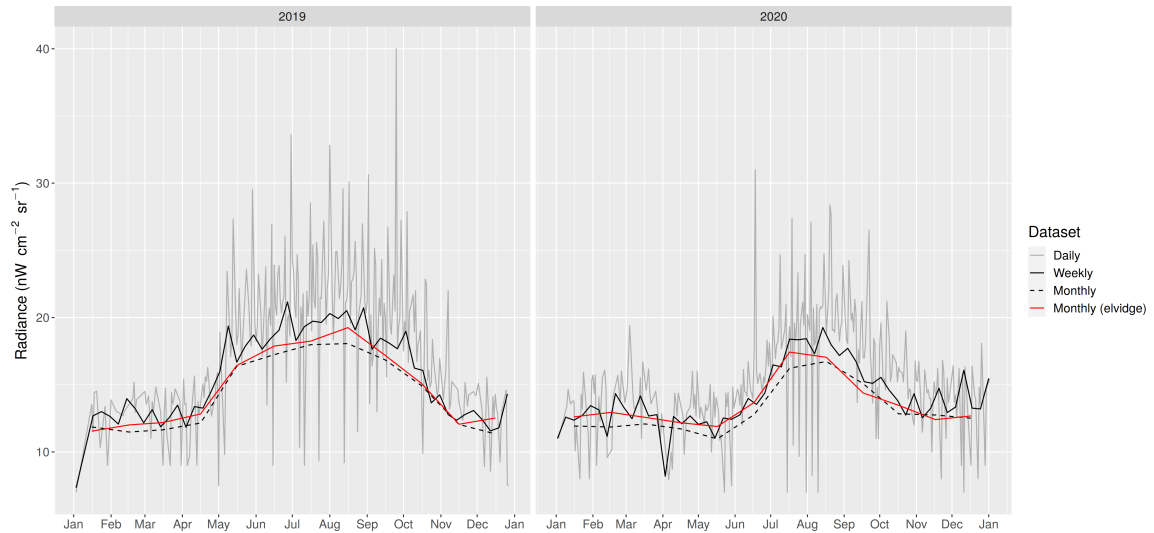


(ii) Δείγμα αστικών δήμων

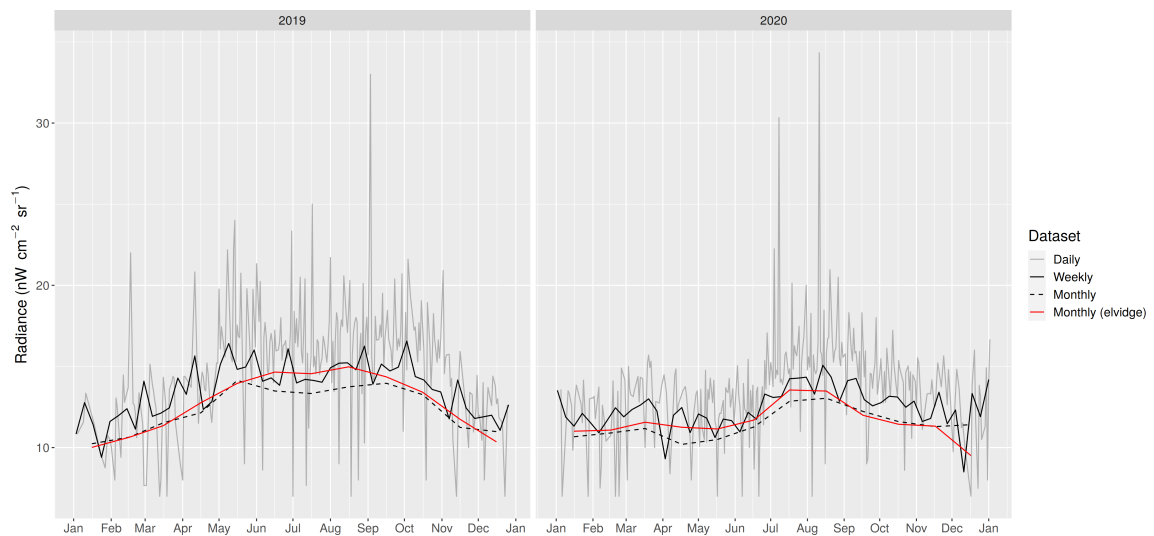
Διάγραμμα 49: Η αθροιστική απόκλιση από την κανονικότητα για την περίοδο Μάρτιος-Ιούνιος 2020 των νησιωτικών τουριστικών περιοχών (i) και μεγάλων αστικών δήμων της Ελλάδας (ii). (Πηγή: Stathakis et al., 2021).

Επιπλέον στα διαγράμματα 50 ως 53 παρατίθεται ενδεικτικά και συγκριτικά για την Μύκονο και την Σαντορίνη η μέση ημερήσια, εβδομαδιαία και μηνιαία ακτινοβολία των νυχτερινών φώτων snpp-VIIRS Black Marble για τα έτη 2019 και 2020. Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι το γενικό απαγορευτικό το 2020 και η συνεπαγόμενη μείωση των τουριστικών αφίξεων είχε σαν αποτέλεσμα τον χρονικό περιορισμό της τουριστικής σεζόν. Επιπλέον, η τουριστική κίνηση το 2020 δεν προσεγγίζει τα μέγιστα της σεζόν όπως αυτή αποδίδεται το 2019. Τα ημερήσια δεδομένα Black Marble και τα εβδο-

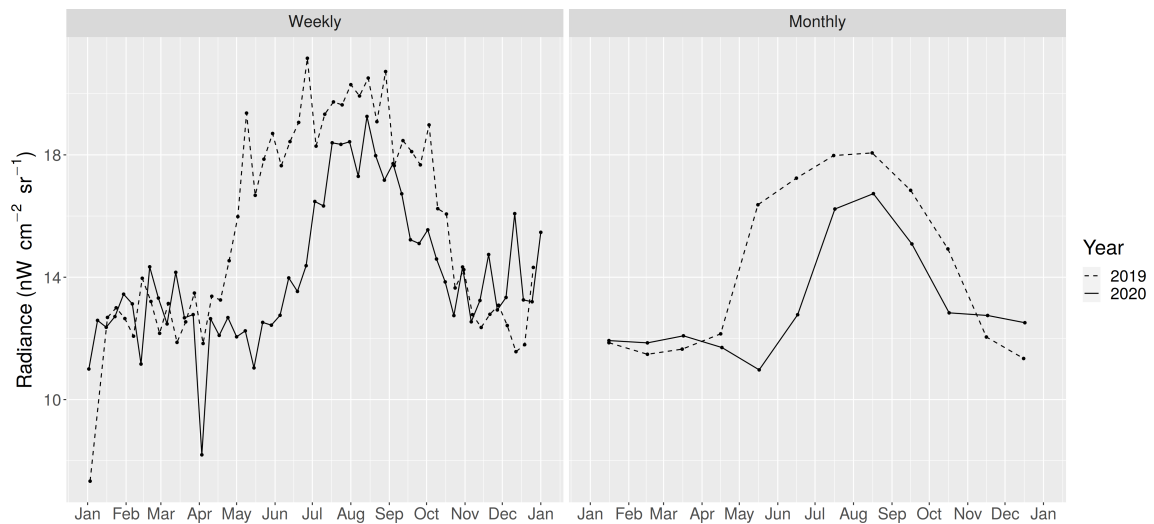
μαδιαία σύνθετα που προκύπτουν από αυτά παρέχουν πληροφορία σε λεπτομερέστερη χρονική ανάλυση για την εξέλιξη της τουριστικής δραστηριότητας σε σχέση με τα μηνιαία σύνθετα.



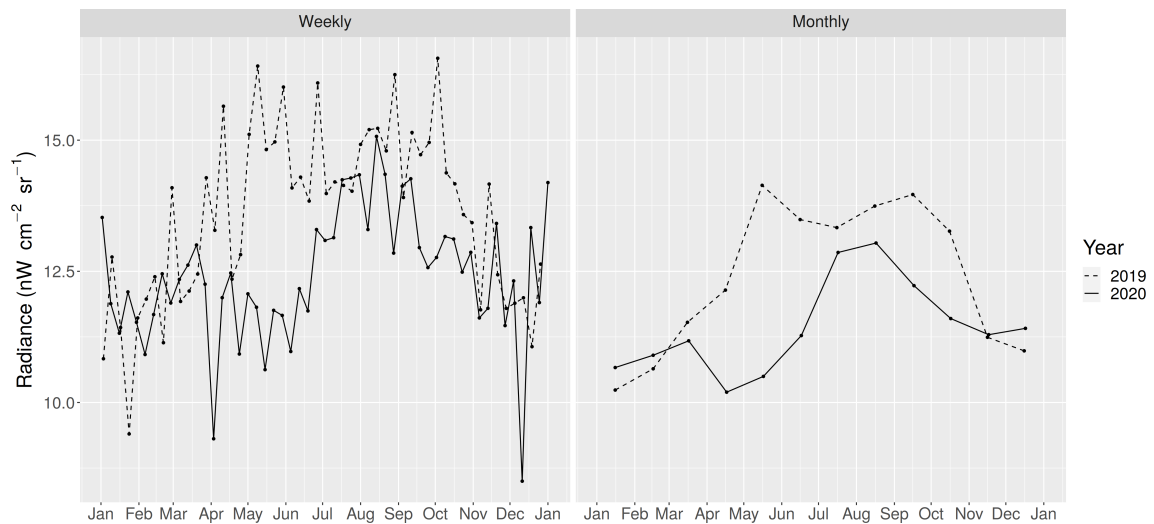
Διάγραμμα 50: Μέση τιμή ακτινοβολίας νυχτερινών φώτων ανά ημέρα, εβδομάδα και μήνα στην Μύκονο για το 2019 και 2020. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



Διάγραμμα 51: Μέση τιμή ακτινοβολίας νυχτερινών φώτων ανά ημέρα, εβδομάδα και μήνα στην Σαντορίνη για το 2019 και 2020. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

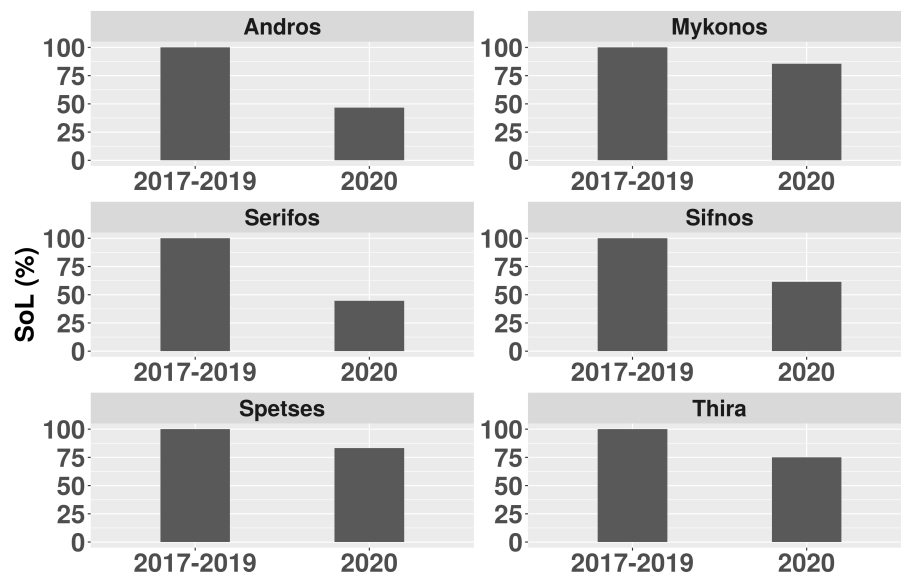


Διάγραμμα 52: Σύγκριση μέσης εβδομαδιαίας και μηνιαίας ακτινοβολίας στην Μύκονο για το 2019 και 2020. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

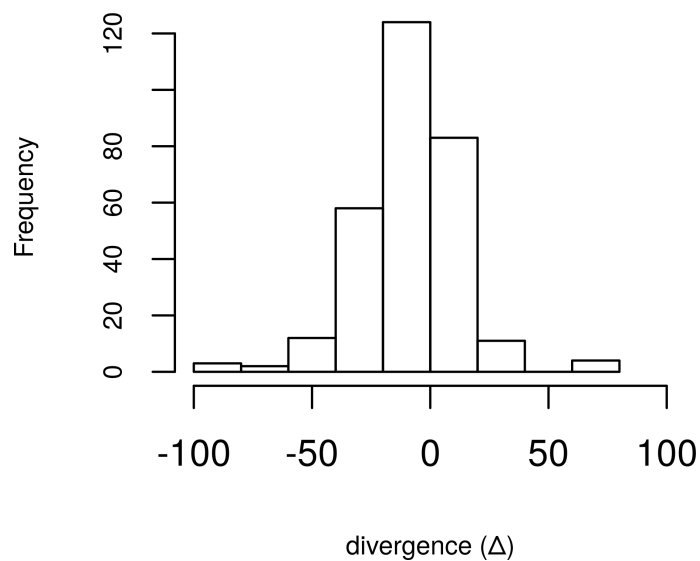


Διάγραμμα 53: Σύγκριση μέσης εβδομαδιαίας και μηνιαίας ακτινοβολίας στην Σαντορίνη για το 2019 και 2020. (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

Στο διάγραμμα 54 καταγράφεται η αθροιστική απόκλιση από την κανονικότητα για την περίοδο Μάρτιος-Ιούνιος των νησιωτικών τουριστικών περιοχών. Είναι σαφής η μείωση της δραστηριότητας για το 2020 (βλ. διάγραμμα 55) και σε αντιστοιχία με τους επίσημους υπολογισμούς για μείωση της τάξεως του 60 %–80 % μέχρι το τέλος της χρονιάς (Commision, 2020).

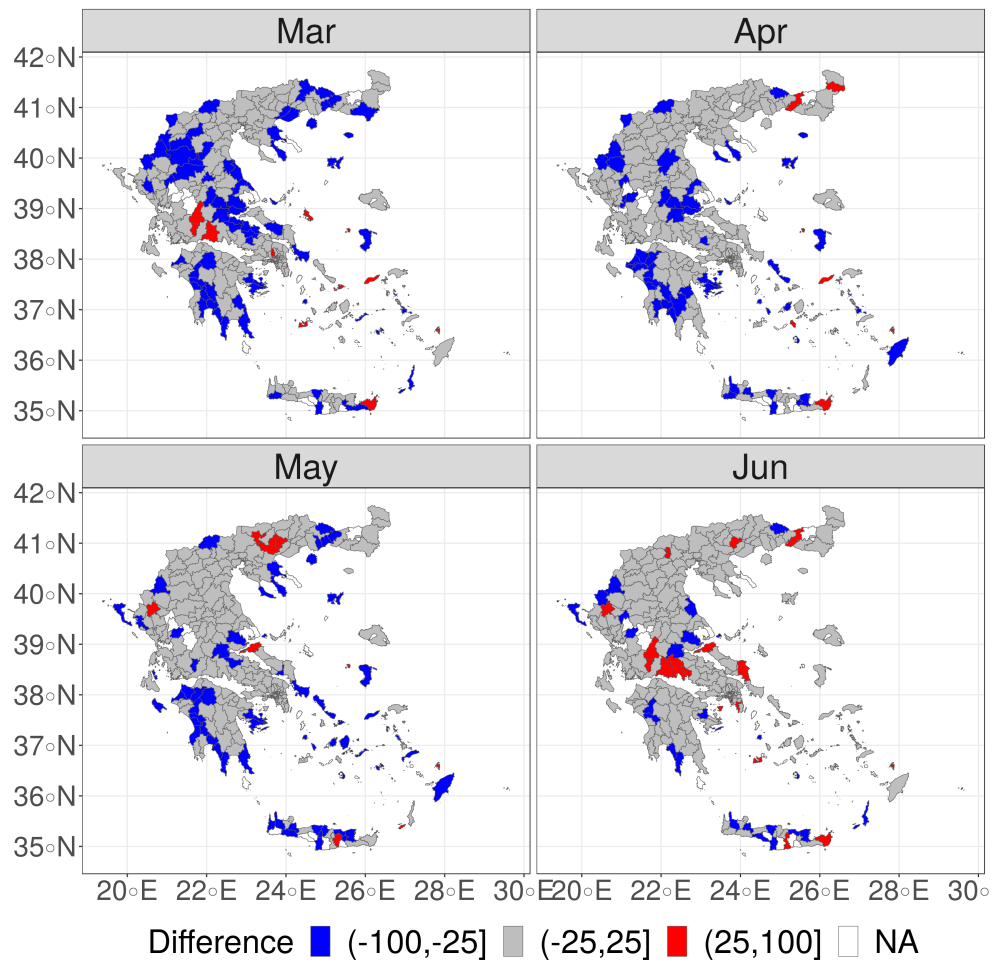


Διάγραμμα 54: Αθροιστική απόκλιση (μήνες Φεβρουάριος-Μάιος 2020) από την κανονικότητα για τους τουριστικούς δήμους του διαγράμματος 49i. (Πηγή: Stathakis et al., 2021).



Διάγραμμα 55: Ιστόγραμμα μηνιαίας αθροιστικής απόκλιση ( $\Delta$ ) από την κανονικότητα. Μέσος όρος: -9% ( $\sigma$ :21). (Πηγή: Stathakis et al., 2021).

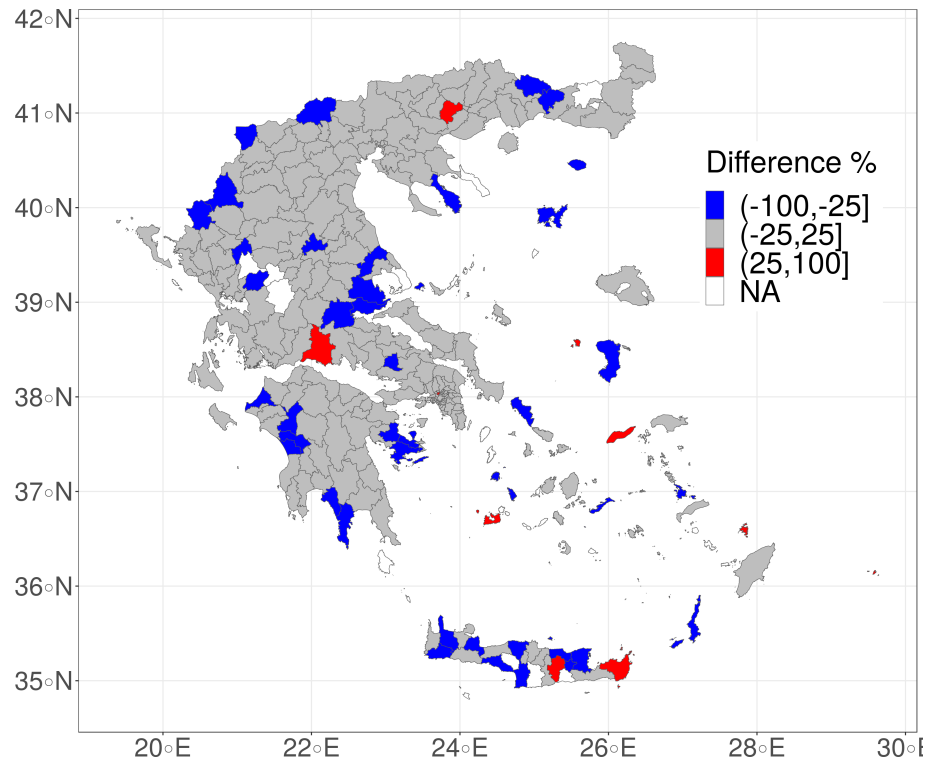
Ο δείκτης κανονικότητας ( $\Delta$ ) για κάθε μήνα για τους δήμους παρατίθεται στον Χάρτη 28.



Χάρτης 28: Μηνιαία απόκλιση ( $\Delta$ ) του SoL από την κανονικότητα για τους μήνες Μάρτιος ως Ιούνιος. (Πηγή: Stathakis et al., 2021).

Στον Χάρτη 29 φαίνεται η αθροιστική απόκλιση από την κανονικότητα ( $\Delta$ ).





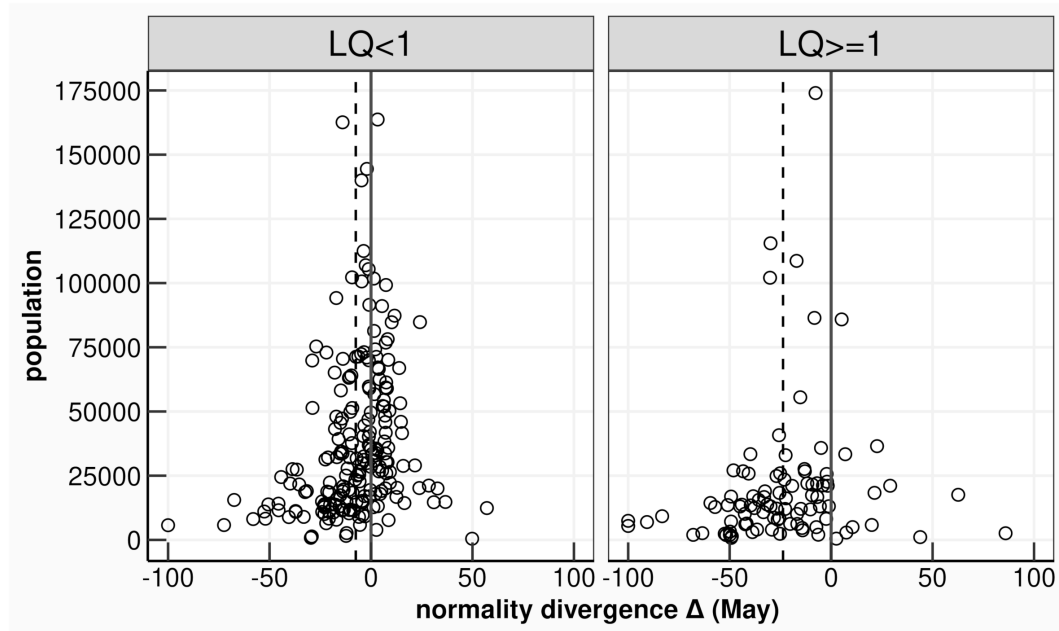
Χάρτης 29: Αθροιστική απόκλιση (Δ) (Μάρτιος-Ιούνιος) για το SoL. (Πηγή: Stathakis et al., 2021).

Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην σταθερή εκπομπή φώτων στους μεγάλους δήμους κατά το lockdown δεν είναι προφανείς ούτε εύκολα αναγνωρίσιμοι (Coesfeld et al., 2018). Ενδεχομένως, το ανεπτυγμένο πλέγμα αστικών υποδομών (οδικό δίκτυο, βιομηχανικές και εμπορικές εγκαταστάσεις κτλ) συμβάλλουν σε τέτοιο ισχυρό ποσοστό επί της συνολικής εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, η σταθερότητα των οποίων υπερβαίνει τυχόν μειώσεις από το lockdown. Αντίθετα, στις νησιωτικές τουριστικές περιοχές, που είναι πιο αραιοκατοικημένες και με χαμηλό επίπεδο υποδομών εικάζεται ότι η κυκλοφορία συμβάλλει περισσότερο στην συνολική εκπεμπόμενη ακτινοβολία με αποτέλεσμα να αποδίδεται και μέσω του δείκτη απόκλισης από την κανονικότητα.

Εκτός όμως από το επίπεδο των υποδομών, η οικονομική εξειδίκευση των δήμων φαίνεται να είναι παράγοντας που διαφοροποιεί τις συνέπειες από το lockdown. Ως μέτρο της εξειδίκευσης επιλέχθηκε ο *Δείκτης χωροθέτησης*, Location Quotient (LQ) που εξαρτάται από το ποσοστό των απασχολούμενων στον ξενοδοχειακό τομέα. Για κάθε δήμο υπολογίστηκε ο *Δείκτης χωροθέτησης* ως εξής:

$$LQ_{municipality} = \frac{\left( \frac{\text{hospitality jobs}_{municipality}}{\text{total workforce}_{municipality}} \right)}{\left( \frac{\text{hospitality jobs}_{country}}{\text{total workforce}_{country}} \right)} \quad (29)$$

όταν ο  $LQ = 1$  τότε ποσοστό των εργαζομένων στον ξενοδοχειακό κλάδο είναι ίσος με τον μέσο όρο της χώρας. Όταν ο  $LQ > 1$  τότε σημαίνει ότι ο δήμος εξειδικεύεται στον ξενοδοχειακό κλάδο.



Διάγραμμα 56: Το μέγεθος του δείκτη απόκλισης από την κανονικότητα συναρτήσει του πληθυσμού και της εξειδίκευσης στον τουρισμό (αριστερά και δεξιά τμήματα). Οι μέσοι όροι (διακεκομμένες γραμμές) είναι -7,5 αριστερά και -23,7 δεξιά. (Πηγή: Stathakis et al., 2021).

Στο διάγραμμα 56 παρατίθενται δύο διαφορετικές ομάδες δήμων με διαφορετικά επίπεδα εξειδίκευσης στον ξενοδοχειακό κλάδο. Στο δεξί τμήμα του διαγράμματος είναι δήμοι με σημαντική εξειδίκευση στον ξενοδοχειακό κλάδο ( $LQ \geq 1$ ). Στο αριστερό τμήμα είναι δήμοι με μικρότερη εξειδίκευση από τον μέσο όρο της χώρας στον αντίστοιχο κλάδο ( $LQ < 1$ ). Όσο πιο μεγάλη είναι η εξειδίκευση στον κλάδο τόσο πιο ακραίος είναι ο δείκτης απόκλισης από την κανονικότητα ( $\Delta$ ). Αυτό σημαίνει ότι περιοχές με λίγο πληθυσμό και οικονομική εξάρτηση από τον τουρισμό επηρεάζονται σε μεγαλύτερο βαθμό από τις επιδράσεις της πανδημίας.

#### 4.3.7 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ISS ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ

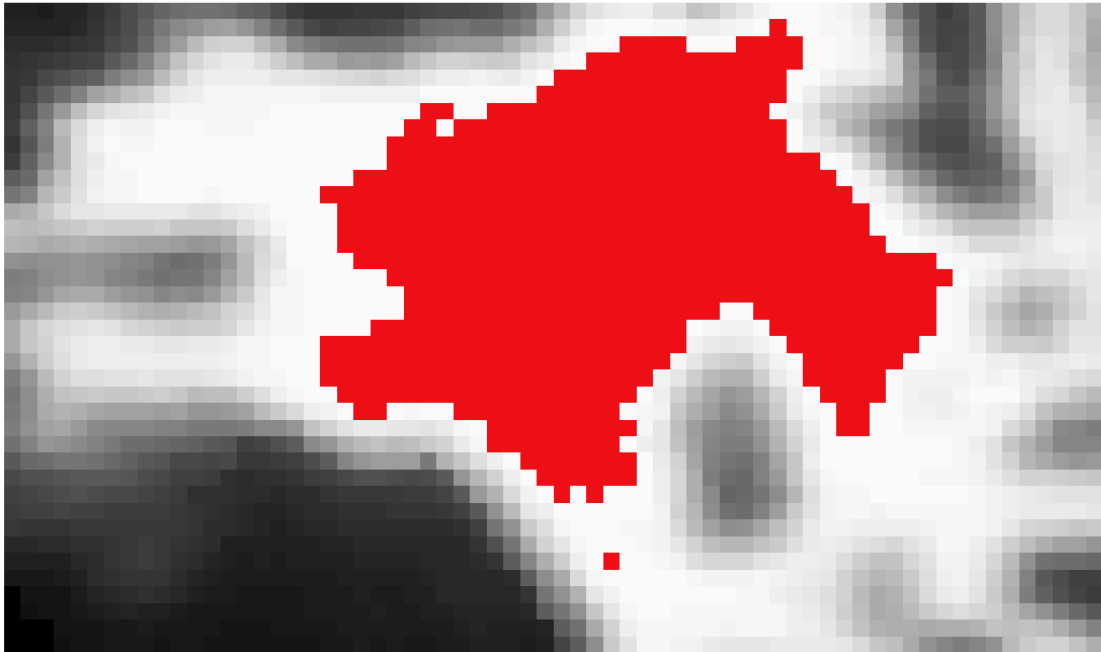
Με μία οπτική εξέταση της εικόνας ISS για την Αθήνα διαπιστώνεται πληροφορία που δεν είναι εμφανής στις υπόλοιπες πηγές εικόνων. Πέρα από την χωρική ακρίβεια και λεπτομέρεια, παρατηρούμε χρωματική διαβάθμιση της πληροφορίας σε λευκό και κίτρινο φως. Λευκά χρώματα στην εικόνα υποδηλώνουν φωτισμό με λαμπτήρες Εκκένωσης Υδραργύρου (mercury Vapour), Λαμπτήρες Φθορισμού (Fluorescent Lamps), αλογονιδίων (metal-halide) ή LED ενώ κίτρινο χρώμα υποδηλώνει φωτισμό με λαμπτήρες HPS (Kyba et al., 2014). Τμήματα των βασικών οδικών αρτηριών (όπως στην λεωφ. Κηφισίας, Μεσογείων, Βουλιαγμένης, Πειραιώς) ενδεχομένως να έχουν μεταβεί στις τεχνολογίες φωτισμού με LED (κρίνοντας οπτικά και με μοναδικό κριτήριο την χρωματική διαβάθμιση). Το ίδιο παρατηρείται και για πυρήνες εντός του αστικού ιστού (π.χ. σε περιοχές του Πειραιά, σε εμπορικά σημεία του Χαλανδρίου, στο Φάληρο).

Μέσω των δορυφορικών εικόνων ISS, χαρακτηριστικές δομές αποτυπώνονται με ακρίβεια όπως τα «Ελληνικά Πετρέλαια» και ο εμπορευματικός σταθμός του ΟΣΕ στον Ασπρόπυργο, οι εγκαταστάσεις του νέου αεροδρομίου «Ελ. Βενιζέλος» και το εκπαιδευτικό χωριό “McArthurGlen” στα Σπάτα, το Ολυμπιακό χωριό στους Θρακομακεδόνες, το Ολυμπιακό κέντρο Ιππασίας στο Μαρκόπουλο και σε επαρκή βαθμό οι κυριότερες οδικές αρτηρίες του αστικού ιστού. Οι δομές αυτές είναι μετά βίας ορατές σε άλλες πηγές δεδομένων (snpp-VIIRS, LJ1-01) ενώ δεν δύναται να εντοπιστούν καθόλου σε άλλες (DMSP/OLS). Με σαφήνεια αποδίδονται τα όρια του αστικού ιστού, η ακτογραμμή, ορεινοί όγκοι και χώροι πρασίνου (π.χ. λόφος Φιλοπάππου, Λυκαβηττός, Υμηττός, Αιγάλεω όρος, άλσος Βεΐκου κ.α.) και εντοπίζονται πυρήνες έντονης οικονομικής δραστηριότητας. Διαφορές στην χρωματική διαβάθμιση και στην φωτεινότητα στις εικόνες ISS μπορεί να συμβολίζουν διαφορετικές χρήσεις γης, διαφορετικές συνθήκες κοινωνικό-οικονομικής ανάπτυξης (Kuffer et al., 2017) αλλά και διαφορετικές τεχνολογίες φωτισμού.

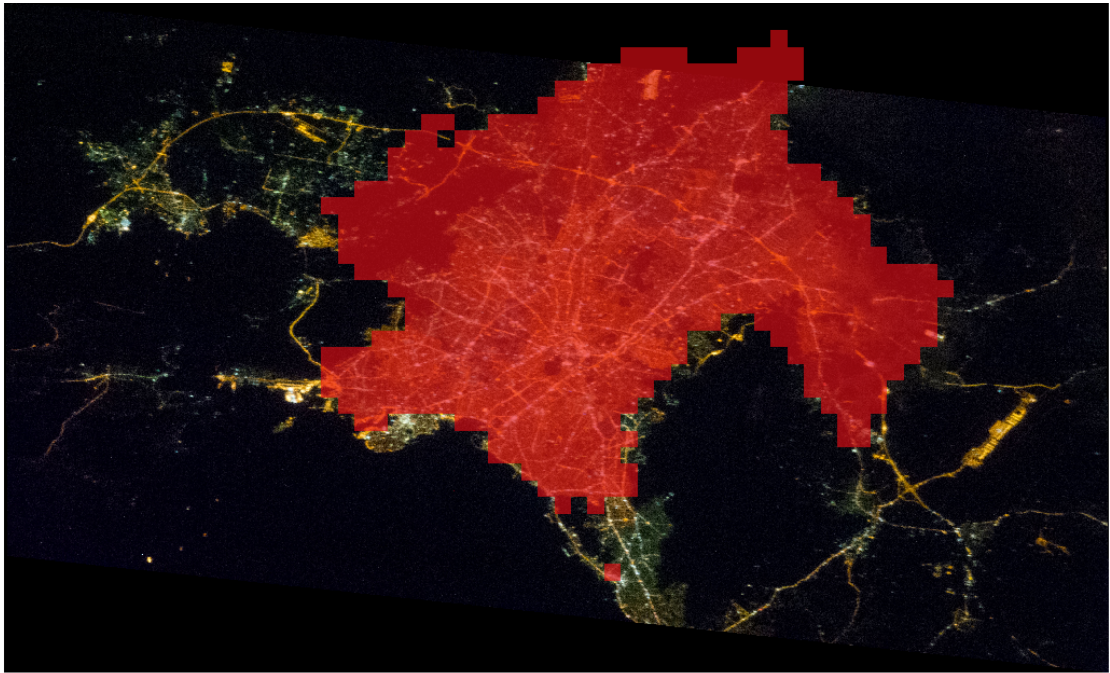
Για τις εικόνες ISS η χρωματική διαβάθμιση μπορεί να αποτελέσει το κριτήριο χαρακτηρισμού της αστικής λειτουργίας ή του επιπέδου οικονομικής ανάπτυξης μιας περιοχής. Για τις εικόνες snpp-VIIRS το κριτήριο αυτό είναι το μέγεθος της ακτινοβολίας και η φωτεινότητα μιας περιοχής (π.χ. κέντρο, αεροδρόμιο, λιμάνια, στάδια, βιομηχανικές εγκαταστάσεις). Βέβαια για τις εικόνες DMSP/OLS το πρόβλημα του κορεσμού αποτελεί βασικό περιορισμό για να αποδώσει αυτό το κριτήριο οικονομικής ανάπτυξης με βάση την φωτεινότητα. Ανάλογα με το επίπεδο ανάπτυξης μιας χώρας, αναπτυσσόμενη ή ανε-

πτυγμένη, οι μέγιστες ακτινοβολίες στις πόλεις συναρτώνται με διαφορετικούς κλάδους οικονομίας, με την βιομηχανία στην πρώτη περίπτωση, με το εμπόριο και την αναψυχή στην δεύτερη (Kyba et al., 2014).

Συγκρίνοντας τις εικόνες ISS με αυτές του DMSP/OLS το πρώτο βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι εικόνες του ISS είναι καταλληλότερες για ενδο-αστική επισκόπηση λόγω της μεγαλύτερης χωρικής διακριτικής ικανότητας. Ιδιαίτερα δε στον αστικό πυρήνα όπου οι εικόνες DMSP/OLS είναι περιορισμένης χρηστικότητας λόγω κορεσμού. Στον Χάρτη 30 φαίνεται το τμήμα της Αθήνας που προσβάλλεται από το πρόβλημα του κορεσμού στα δεδομένα DMSP/OLS. Το εν λόγω πρόβλημα αποκαλύπτεται πιο δραματικά αν το προβάλλουμε στην αντίστοιχη εικόνα ISS, όπου ουσιαστικά φαίνεται ότι πλήττεται ένα μεγάλο μέρος της έκτασης της Αθήνας (βλ. Χάρτης 31).



Χάρτης 30: Ο κορεσμός του αισθητήρα DMSP/OLS (κόκκινο χρώμα), σε υπόβαθρο DMSP/OLS στην Αθήνα. (Πηγή: Ιδία επεξεργασία).



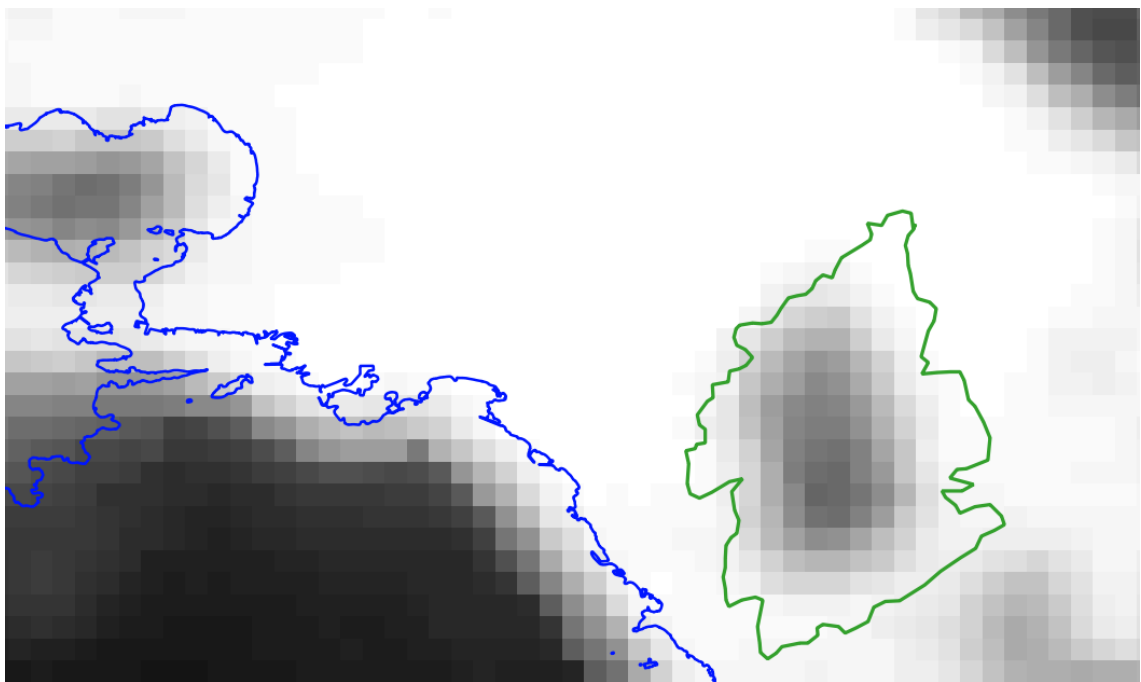
Χάρτης 31: Ο κορεσμός του αισθητήρα DMSP/OLS (κόκκινο χρώμα) σε υπόβαθρο ISS στην Αθήνα. (Πηγή:ISS, ίδια επεξεργασία).

Ανάλογο είναι και το πρόβλημα, με το φαινόμενου της υπερ-λάμψης (overglow). Στον Χάρτη 32 φαίνεται η ακρίβεια με την οποία αποτυπώνονται τα όρια της ακτογραμμής και τα όρια του ορεινού όγκου του Υμηττού από τις εικόνες ISS. Αντίστοιχα, στον Χάρτη 33 φαίνεται η υπερβολή στην απόδοση τιμών φωτός τόσο εντός της θάλασσας όσο και μέσα στον ορεινό όγκο του Υμηττού από τον DMSP/OLS.





Χάρτης 32: Η ακτογραμμή (μπλε γραμμή) και τα όρια του Υμηττού (πράσινη γραμμή), υπόβαθρο ISS. (Πηγή: ISS, ίδια επεξεργασία).



Χάρτης 33: Η ακτογραμμή (μπλε γραμμή) και τα όρια του Υμηττού (πράσινη γραμμή), υπόβαθρο DMSP/OLS. (Πηγή: DMSP/OLS, ίδια επεξεργασία).

Οι εικόνες ISS αποδίδουν με αρκετή λεπτομέρεια και μεγαλύτερη αξιοπιστία τις αδιαπέρατες επιφάνειες (Kotarba και Aleksandrowicz, 2016) σε σχέση με τον DMSP/OLS. Επιπλέον, οι εικόνες ISS επαρκούν για την έρευνα τόσο των ενδοαστικών χρήσεων γης όσο και των κοινωνικο-οικονομικών χαρακτηριστικών της (Kuffer et al., 2017· Levin και

Duke, 2012).

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά/πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι εικόνες ISS είναι μια ακόμα σειρά επιχειρημάτων που ενισχύουν την πρόταση για την εκτόξευση ενός δορυφόρου ανάλογων χαρακτηριστικών με υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα, ραδιομετρική διαβαθμονόμηση και σταθερότητα, με αποκλειστικό σκοπό την καταγραφή των ανθρωπογενών νυχτερινών φώτων σε ενδοαστικό επίπεδο (Elvidge et al., 2007).

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσω της διερεύνησης των ερευνητικών ερωτημάτων που πλαισιώνουν την τρέχουσα έρευνα, μπορούν να διεξεχθούν μια σειρά συμπερασμάτων που αφορούν την χρησιμότητα των δεδομένων νυχτερινών φώτων σε σχέση με τον αστικό χώρο και την αστική δραστηριότητα. Στην συνέχεια, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν ανά ερευνητικό ερώτημα.

### Ερευνητικό ερώτημα 1:

Η διόρθωση με τις μεθόδους Dark Object Subtraction και αντανakλαστικότητα BRDF είναι και στις δύο περιπτώσεις ικανοποιητική. Και οι δύο μέθοδοι αποτελούν μια επαρκή πρόταση για την διόρθωση των δεδομένων από την σεληνιακή ακτινοβολία και την δημιουργία μιας χρονοσειράς καθημερινών εικόνων για την έρευνα βραχυχρόνιων αστικών φαινομένων. Κατά συνέπεια, οι μέθοδοι καλύπτουν σε σημαντικό βαθμό τις απαιτήσεις του ερευνητικού ερωτήματος E1, ιδιαίτερα όταν επικεντρώνονται σε μικρότερες περιοχές μελέτης.

Στην πρώτη περίπτωση (Dark Object Subtraction) απαιτείται η χρήση μίας δευτερεύουσας περιοχής που να πληρεί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Η προϋπόθεση αυτή ενδέχεται να μην πληρούται σε όλες τις περιπτώσεις του χώρου. Για παράδειγμα σε περιοχές της Β. Ευρώπης με έντονη αστικοποίηση, υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και έντονη φωτορύπανση δεν είναι βέβαιο ότι θα εξασφαλιστεί μια περιοχή Dark Object σε εγγύτητα με την περιοχή μελέτης. Σύμφωνα με τους Votsi et al. (2017) μόνο το 36,82 % της έκτασης της Ευρωπαϊκής Ένωσης (1.459.182 km<sup>2</sup>) αποτελείται από περιοχές χωρίς φωτορύπανση. Ενώ δεν λείπουν και οι ακραίες περιπτώσεις όπως της Εσθονίας και της Σλοβακίας όπου το ποσοστό αυτό μπορεί να περιοριστεί στο 6,36 % και 5,84 % αντίστοιχα.

Επιπλέον ο διάμεσος και τα αποτελέσματα της μεθόδου μπορεί να επηρεαστούν ανάλογα με τις κενές τιμές που θα προκύψουν από την εφαρμογή των τιμών επισήμανσης (flag values) στα πρωτογενή δεδομένα και κυρίως από την νεφοκάλυψη κατά τους χειμερινούς μήνες. Η διόρθωση με δεδομένα αντανakλαστικότητας BRDF από την άλλη έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί συνοδευτικά δεδομένα και μεθόδους φυσικής, προϋποθέσεις που δυσχεραίνουν την εφαρμογή του, ιδιαίτερα όταν πρόκειται να εφαρμοστεί σε εκτεταμένες περιοχές μελέτης. Ωστόσο, με το αποτέλεσμα των διορθώσεων μπορεί να προκύψει μια χρονοσειρά δεδομένων η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έρευνα της αστικής



δραστηριότητας σε ημερήσια βάση αλλά με την αποδοχή των προαναφεθέντων αδυναμιών.

Από την άλλη, η μέθοδος Median Shift έχει το πλεονέκτημα της ευχρηστίας έναντι των προαναφερθέντων μεθόδων. Αφενός δεν απαιτεί δευτερεύουσα βοηθητική περιοχή (βλ. μέθοδος Dark Object Subtraction) και αφετέρου δεν χρειάζεται βοηθητικά δεδομένα και εφαρμογή μεθόδων φυσικής (βλ. μέθοδος διόρθωσης με δεδομένα BRDF). Όμως, όπως και η μέθοδος Dark object Subtraction, το αποτέλεσμα της επηρεάζεται από τον διάμεσο της νύχτας αναφοράς της νέας σελήνης. Ο διάμεσος εξαρτάται από το ποιές ημερομηνίες και ποιά δεδομένα θα εξαιρεθούν με βάση τα κριτήρια που ορίζονται από τις τιμές επισήμανσης των δεδομένων (flag values). Ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα και κατά συνέπεια την απόρριψη δεδομένων από την μέθοδο είναι οι καιρικές συνθήκες (νέφη και χιόνι). Οπότε σε περιοχές με ευνοϊκές καιρικές συνθήκες (μικρότερο ποσοστό απόρριψης δεδομένων λόγω flag values) η μέθοδος μπορεί να προσφέρει καλά αποτελέσματα και να καλύψει επαρκώς το ερευνητικό ερώτημα E1 για την σύνθεση μια αξιόλογης χρονοσειράς ημερησίων δεδομένων για την μελέτη βραχυχρόνιων αστικών φαινομένων. Ο δείκτης είναι καινοτόμος δεδομένου ότι, με βάση την βιβλιογραφία που έχει διερευνηθεί, δεν έχει υπάρξει άλλη πρόταση για την διόρθωση των δεδομένων με στατιστικά μέσα.

## **Ερευνητικό ερώτημα 2:**

Σχετικά με το ερευνητικό ερώτημα E2 που αφορά την ανάπτυξη μεθοδολογίας για την βελτίωση των δεδομένων DMSP/OLS ώστε να αποδίδεται επαρκώς ο αστικός πυρήνας και οι παραλλαγές της αστικής δραστηριότητας στον αστικό χώρο διαπιστώθηκε ότι αυτή είναι σχετικά εύκολη στην υλοποίηση και τα αποτελέσματα της εφαρμογής είναι αξιόλογα. Με την προτεινόμενη μέθοδο αποδίδεται με μεγαλύτερη ευκρίνεια η παραλλαγή της έντασης του αστικού πυρήνα μέσω του συνδυασμού νυχτερινών φώτων DMSP/OLS και δεδομένων ραντάρ QuickScat. Παράλληλα, η απόδοση της παραλλαγής του αστικού τοπίου αποδίδεται επαρκώς και σε ενδοαστικές περιοχές με ελλιπή βλάστηση όπου τα δεδομένα SAR εντοπίζουν την διαφοροποίηση ανάμεσα σε δομημένη αστική περιοχή και σε γυμνό έδαφος. Η προτεινόμενη μέθοδος έρχεται να καλύψει το κενό που αφήνει ο δείκτης VANUI.

Η εφαρμογή της μεθόδου με δεδομένα SAR με μεγαλύτερη χρονοσειρά και υψηλότερη χωρική ακρίβεια αναμένεται να επιφέρει ακόμα καλύτερα αποτελέσματα στην διόρ-

θωση ενώ η υψηλή συσχέτιση με τα δεδομένα snpp-VIIRS μπορεί να συμβάλλει στην δημιουργία μίας ενιαίας χρονοσειράς δεδομένων DMSP/OLS και snpp-VIIRS.

Ωστόσο δεν πρέπει να παραβλέψουμε το γεγονός ότι τα QuickSCAT/Seawinds δεδομένα είναι περιορισμένης χρονοσειράς και κατά συνέπεια ήταν επιβεβλημένη η διόρθωση των νυχτερινών φώτων του 2013 με δεδομένα QuickSCAT/Seawinds του 2009. Αυτή η επιλογή αν και δεν έχει σημαντικές επιπτώσεις στην εφαρμογή σε ευρωπαϊκές και αμερικάνικες πόλεις λόγω του αργού ρυθμού αστικοποίησης, μπορεί ωστόσο να έχει πιο σημαντικές ασυμβατότητες σε χώρες της Ασίας και της Αφρικής. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος του χρονικού χάσματος που έχει η χρήση των QuickSCAT/Seawinds δεδομένων, προτείνεται η δοκιμή και με διαφορετικά δεδομένα (όπως το ραντάρ Oceansat-2 του Indian Space Research Organization). Επιπλέον, προτείνεται η αντικατάσταση των δεδομένων της μεθόδου με υψηλότερης ανάλυσης δεδομένα (όπως Sentinel-1) για την ακριβέστερη διόρθωση των δεδομένων, ιδιαίτερα στον αστικό πυρήνα που η βλάστηση είναι πιο περιορισμένη και τα δεδομένα DMSP/OLS πλήττονται από το πρόβλημα του κορεσμού. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραβλεφθεί το πλεονέκτημα της χρήσης των δεδομένων QuickSCAT/Seawinds σε μεγάλες περιοχές μελέτη δεδομένης της μικρότερης προεπεξεργασίας που απαιτείται για την χρήση τους.

### **Ερευνητικό ερώτημα 3:**

Η πρόβλεψη με το μοντέλο SLEUTH προσφέρει πιο ολοκληρωμένα αποτελέσματα σε σχέση με μια μονομερή πρόβλεψη της έντασης της ακτινοβολίας καθώς η εκτίμηση περιλαμβάνει και την έκταση της εξάπλωσης στον χώρο. Με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου μπορεί να γίνει ορθή χάραξη χωροταξική πολιτικής αφού περιγράφονται πιο λεπτομερώς τα σημεία εξάπλωσης του αστικού χώρου και η ανάδειξη νέων πυρήνων. Η απόκλιση στον βαθμό αστικής εξάπλωσης είναι ορατή μέσω του μοντέλου SLEUTH. Έτσι σε περιπτώσεις που προβλέπεται σημαντική εξάπλωση (π.χ. σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου στην Κεντρική Μακεδονία) δίνεται η δυνατότητα, μέσω έγκαιρου σχεδιασμού, να αποφευχθούν μελλοντικές αρνητικές επιπτώσεις από την άναρχη δόμηση, τα ακραία φυσικά φαινόμενα, τον υπερσυγκεντρωτισμό δραστηριοτήτων. Από την άλλη, περιοχές που η αστική εξάπλωση αναμένεται να είναι πιο περιορισμένη ή ανύπαρκτη (π.χ. Ήπειρος) μπορεί να ενισχυθούν με ειδικά μέτρα (π.χ. επενδύσεις, δημόσια έργα) ώστε να υπάρχει ισόρροπη ανάπτυξη στον χώρο. Εκτός από την πρόβλεψη της αστικής εξάπλωσης σε αυστηρά χωροχρονικά πλαίσια, βαρύτητα πρέπει να δοθεί και στους βασικούς

γενεσιουργούς παράγοντες αυτής. Σύμφωνα με τους Polyzos et al. (2013) παράγοντες όπως η παράνομη δόμηση, η δεύτερη κατοικία σε συνδυασμό με τις αμμόδεις παραλίες, το επίπεδο ευημερίας μιας περιφέρειας, το μέγεθος και η μεταβολή του πληθυσμού σε συνδυασμό με την έμμεση πληθυσμιακή πίεση από γειτονικές περιφέρειες καθώς και η τουριστική επισκεψιμότητα είναι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την αστική εξάπλωση.

Όμως και η πρόβλεψη με το μοντέλο SLEUTH απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, είτε λόγω το προβλημάτων που υπεισέρχονται από τις ελλείψεις των δεδομένων είτε από εν γένει αδυναμίες του μοντέλου. Κατά την επεξεργασία των δεδομένων DMSP/OLS εξαιρέθηκαν (όριο threshold για τον περιορισμό της υπερλάμψης) από την πρόβλεψη μικροί οικιστικοί πυρήνες ή αγροτικοί οικισμοί με αποτέλεσμα να μην συμπεριλαμβάνονται στην πρόβλεψη. Το μοντέλο εξάπλωσης θα μπορούσε να εκτελεστεί στο μέλλον με δεδομένα snpp-VIIRS όταν αυτά θα έχουν σχηματίσει πιο επαρκή χρονοσειρά. Ακόμα, η ποιότητα των δεδομένων εισόδου (μοντέλο εδάφους, οδικό δίκτυο, χρήσεις γης) μπορεί να επηρεάσει ριζικά το αποτέλεσμα της πρόβλεψης. Τέλος δεν πρέπει να αγνοηθεί μια σειρά παραδοχών που μπορεί να επηρεάσουν την βαθμονόμηση και σχετίζονται με την θεωρία των κυψελοειδών αυτομάτων, τον αλγόριθμο Deltatron και τις επαναλήψεις Monte Carlo.

#### **Ερευνητικό ερώτημα 4:**

Τα μοντέλα πρόβλεψη που εφαρμόστηκαν (γραμμικό, εκθετικό, πολυωνυμικό) προβλέπουν την ένταση της νυχτερινής ακτινοβολίας των διαβαθμονομημένων δεδομένων DMSP/OLS ανά κελί (pixel). Απαντάται με αυτόν τον τρόπο το ερευνητικό ερώτημα E4. Συνεπώς η μέθοδος αυτή όχι μόνο προβλέπει τον βαθμό της έντασης της ακτινοβολίας (μέσω του δείκτη SoL) στο μέλλον αλλά και που εντοπίζεται η ένταση αυτή χωρικά. Άρα αποτελεί ένα εργαλείο μακροχρόνιου χωροταξικού και πολεοδομικού σχεδιασμού για τα σημεία πίεσης στον υφιστάμενο αστικό ιστό.

Ωστόσο δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι η μέθοδος βασίζεται για την πρόβλεψη μόνο στα δεδομένα νυχτερινών φώτων και την εξέλιξή τους κατά το παρελθόν. Σε μελλοντικές προσπάθειες πρόβλεψης θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν τα νυχτερινά φώτα σε ένα ολοκληρωμένο πολυπαραγοντικό σύστημα πρόβλεψης που θα περιλαμβάνει μεταξύ των άλλων δημογραφικές και οικονομικές μεταβλητές.

Επιπλέον, η πρόβλεψη βασίστηκε στα δεδομένα DMSP/OLS λόγω της μακροχρόνιας χρονοσειράς που αυτά έχουν. Όμως πρέπει να δοθεί προσοχή στην ερμηνεία των απο-

τελεσμάτων καθώς ο κορεσμός (saturation) στον αστικό πυρήνα προφανώς αποκρύπτει τάσεις μεταβολής στο παρελθόν (π.χ. αποκέντρωση) με αποτέλεσμα η αδυναμία αυτή να μεταβιβάζεται και στα αποτελέσματα της πρόβλεψης.

Η πρόβλεψη περιορίζεται στα κελία τα οποία είχαν ήδη τιμές ακτινοβολίας κατά το παρελθόν. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος δεν μπορεί να προβλέψει την εξάπλωση της αστικοποίησης στον χώρο και την δημιουργία νέου αστικού χώρου αλλά μεταβολή της έντασης της αστικοποίησης σε ήδη υφιστάμενο αστικό ιστό. Όπως προαναφέρθηκε, τον περιορισμό αυτόν αντιμετωπίζει η προσομοίωση της μελλοντικής αστικής διάχυσης με το μοντέλο SLEUTH.

#### **Ερευνητικό ερώτημα 5:**

Ο δείκτης φωτορύπανσης που προτάθηκε στην τρέχουσα διατριβή είναι ένα εύχρηστο εργαλείο στα χέρια του ερευνητή αφού με δεδομένα ελεύθερα διαθέσιμα, μπορεί άμεσα να αναπαράγει τον δείκτη για το πεδίο εφαρμογής της έρευνάς του. Τα αποτελέσματά του είναι αξιόπιστα καθώς εντοπίζει την φωτορύπανση σε αστικές και περιαστικές περιοχές αλλά και την ετήσια διακύμανση αυτής όπως αποδείχθηκε στις περιπτώσεις της Μυκόνου και της Σαντορίνης. Ο προτεινόμενος δείκτης φωτορύπανσης καλύπτει σε ικανοποιητικό βαθμό το ερευνητικό ερώτημα (E5).

Ωστόσο ο δείκτης δεν λαμβάνει υπόψιν του την φωτορύπανση που προκαλείται από έμμεση έκθεση στον φωτισμό και τον τεχνητά φωτεινό ουράνιο θόλο (skyglow). Το αποτέλεσμα του δείκτη εξαρτώνται από τα δεδομένα εισόδου. Ο αισθητήρας των δεδομένων snpp-VIIRS, όπως έχει διευκρινιστεί, λόγω της φασματικής του ευαισθησίας δεν είναι εφικτό να καταγράψει την ακτινοβολία από τους λαμπτήρες νέας γενιάς (LED). Και δεδομένου ότι κυριαρχεί η τάση για υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας ο δείκτης πρέπει να χρησιμοποιείται με γνώση αυτού του περιορισμού. Ακόμα, η ανάλυση λεκάνης ορατότητας (viewshed analysis) με βάση την οποία ελέγχεται η ορατότητα μεταξύ στόχου και παρατηρητή επηρεάζεται από την ποιότητα και την χωρική ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Μικρές διαφορές στην χωρική ανάλυση και ακρίβεια του μοντέλου εδάφους μπορεί να έχουν μεγάλη επίπτωση στο αποτέλεσμα. Στις αδυναμίες του δείκτη συγκαταλέγεται και η αγνόηση των καιρικών συνθηκών, οι οποίες όπως αναφέρθηκε μπορεί να πολλαπλασιάσουν την ένταση της φωτορύπανσης (Kyba et al., 2012· Kyba et al., 2011). Στα αρνητικά σημεία του προτεινόμενου δείκτη συγκαταλέγονται οι σημαντικοί υπολογιστικοί πόροι που απαιτεί, γεγονός που τον καθιστά χρονοβόρο στον υπολογισμό του.

Η τηλεπισκόπηση είναι ένας επιστημονικός κλάδος που μπορεί να συμβάλει στην αναγνώριση και παρακολούθηση της παραβίασης των περιβαλλοντικών πολιτικών (Patias et al., 2020). Υπό αυτήν την έννοια ο δείκτης θα μπορούσε να αποτελέσει ένα μέτρο παρακολούθησης και ελέγχου σε περιπτώσεις εφαρμογής πολιτικών που στόχο έχουν τον περιορισμό της φωτορύπανσης.

#### **Ερευνητικό ερώτημα 6:**

Τα δεδομένα νυχτερινών φώτων έρχονται να καλύψουν το κενό στην διάθεση οικονομικών και πληθυσμιακών δεδομένων που αφήνουν οι απογραφές. Η δυνατότητα που προσφέρουν αναδείχτηκε μέσω του υπολογισμού του μηνιαίου ΑΕΠ που επιχειρήθηκε για τις απογραφικές στατιστικές μονάδες NUTS 3 της Ελλάδας. Απαντήθηκε ουσιαστικά το ερευνητικό ερώτημα Ε6 αν δηλαδή τα δεδομένα νυχτερινών φώτων μπορούν να αποτελέσουν βοηθητική μεταβλητή για την εκτίμηση οικονομικών μεταβλητών σε αναλυτική χρονική και χωρική ανάλυση. Τα νέα προϊόντα snpp-VIIRS Black Marble θα επιτρέψουν εκτιμήσεις για ακόμα πιο σύντομα χρονικά βήματα. Όμως, δεν πρέπει να παραβλεφθεί το γεγονός της έλλειψη αντίστοιχων βραχυχρόνιων οικονομικών δεδομένων για τον έλεγχο της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων της εκτίμησης του ΑΕΠ. Η έλλειψη αυτή αφήνει σε εκκρεμότητα την αξιοπιστία της χρήσης των δεδομένων ως βοηθητική μεταβλητή. Ωστόσο, η εφαρμογή των δεδομένων νυχτερινών φώτων ως βοηθητική μεταβλητή είναι εύκολη και το αποτέλεσμα ταυτίζεται με γνωστά οικονομικά μοντέλα εξειδίκευσης στον χώρο.

#### **Ερευνητικό ερώτημα 7:**

Η ενότητα για την εποχικότητα και την εκτίμηση του ΑΕΠ εκμεταλλεύτηκε στην πράξη την υπόθεση εργασίας ότι τα νυχτερινά φώτα έχουν υψηλή συσχέτιση με οικονομικές μεταβλητές. Μέσω της χρήσης των δεδομένων snpp-VIIRS και του υπολογισμού του δείκτη εποχικότητας αναδείχτηκε, σε λεπτομερή χωρική και χρονική κλίμακα, η εποχική διακύμανση της αστικής/οικονομικής δραστηριότητας στον Ελλαδικό χώρο και απαντήθηκε ουσιαστικά το ερευνητικό ερώτημα Ε7. Ο δείκτης επιτρέπει να αναδειχτούν εποχικά χωρικά πρότυπα με διαφορετικά χαρακτηριστικά (διαχωρισμός σε βόρεια και νότια Ελλάδα, νησιωτική και ηπειρωτική ορεινή χώρα, παράλια και ενδοχώρα). Η διαπίστωση αυτή μπορεί να συμβάλει σε έναν χωροταξικό σχεδιασμό με γνώμονα την ισόρροπη χωρική ανάπτυξη.

Επιπλέον, αρκετές περιοχές εμφανίζουν παρατεταμένη εποχικότητα ή πολλαπλάσια

τιμή στον δείκτη από την τιμή του μήνα αναφοράς γεγονός που υποδηλώνει ότι ο δείκτης μπορεί να αξιοποιηθεί για την αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας των περιοχών αυτών. Λόγω του λεπτομερούς χρονικού βήματος (μήνας) στο οποίο γίνεται ο υπολογισμός του δείκτη, προσφέρεται η δυνατότητα έρευνας που σε διαφορετική περίπτωση, με την τυπική χρήση δεδομένων απογραφής, δεν είναι εφικτή. Με την δημοσιοποίηση των νέων δεδομένων snpp-VIIRS Black Marble, τα οποία σύντομα θα διατίθενται πλήρως σε καθημερινή βάση σε παγκόσμια κλίμακα, ο δείκτης είναι εφικτό να υπολογιστεί σε ακόμα πιο αναλυτική χρονική ανάλυση (π.χ. εβδομάδα) και να προσφέρει άμεση παρακολούθηση αστικών φαινομένων.

Προσοχή απαιτείται, όπως σε όλες τις περιπτώσεις, κατά την ερμηνεία του δείκτη. Η αστική δραστηριότητα δεν είναι ίδια κατά τον χρόνο διέλευσης του δορυφόρου (περίπου στις 01:30 πμ). Ο δορυφόρος στιγμιαία αποτυπώνει την ένταση της ακτινοβολίας των φωτών. Για παράδειγμα, τον Αύγουστο κατά τον χρόνο διελεύσης η αστική δραστηριότητα στην Μύκονο είναι διαφορετική από έναν αγροτικό δήμο στην ενδοχώρα λόγω της διαφορετικής εξειδίκευσης της οικονομίας. Επιπλέον, όπως έχει τονιστεί υπάρχουν σημαντικοί παράγοντες (βλ. ενότητα 2.1.7) που επηρεάζουν την ένταση της καταγραφόμενης από τον αισθητήρα ακτινοβολίας και δεν σχετίζονται με την αστική δραστηριότητα. Όπως επίσης δεν πρέπει να αγνοούνται οι νέες τεχνολογίες φωτισμού οι οποίες και αυτές επηρεάζουν το αποτέλεσμα του δείκτη.

#### **Ερευνητικό ερώτημα 8:**

Από την εφαρμογή των νυχτερινών φωτών στην μελέτη της πανδημίας της COVID-19 αποδεικνύεται ότι αυτά αποτελούν μια επαρκή υποκατάσταση μεταβλητή για την καταγραφή της μείωσης της αστικής δραστηριότητας στους δήμους της Ελλάδας. Όμως η μείωση, όπως αποδίδεται από τα νυχτερινά φώτα, δεν είναι ομοιογενής αλλά διαφοροποιείται ανάλογα με το πληθυσμιακό μέγεθος και το οικονομικό προφίλ του κάθε δήμου.

Από την μία δήμοι με μεγάλα αστικά κέντρα, με συμπαγές και ολοκληρωμένο δίκτυο υποδομών και εμπορικών/βιομηχανικών χρήσεων φαίνεται να είναι πιο ανθεκτικοί στην μείωση της αστικής δραστηριότητας λόγω του γενικού απαγορευτικού (lockdown). Από την άλλη, δήμοι με μικρότερο πληθυσμιακό μέγεθος και μεγάλη εξάρτηση από τον τουριστικό τομέα επηρεάζονται περισσότερο από τις συνέπειες της πανδημίας και του απαγορευτικού. Κατά συνέπεια μια ολοκληρωτική εκτίμηση για τις επιπτώσεις της πανδημίας για το σύνολο της χώρας, εμπεριέχει διαφοροποιήσεις που ποικίλουν ανάλογα τα αστικά,

κοινωνικο-οικονομικά και πληθυσμιακά χαρακτηριστικά των επιμέρους περιφερειών. Με βάση τα ανωτέρω, δίνεται απάντηση στο ερευνητικό ερώτημα Ε8 όσο αφορά την δυνατότητα των δεδομένων νυχτερινών φώτων να αποδόσουν την επίδραση έκτακτων συνθηκών στην αστική δραστηριότητα.

Η έρευνα έχει περιοριστεί μέχρι τον Ιούνιο του 2020 λόγω έλλειψης διαθεσιμότητας των δεδομένων για τους επόμενους μήνες. Μελλοντικά μπορεί να εφαρμοστεί και για τους επόμενους μήνες και να καταγραφεί τόσο η συμπεριφορά των δήμων μέσα στο καλοκαίρι του 2020 όσο και η ταχύτητα ανάκαμψης μετά την ουσιαστική λήξη της πανδημίας. Ακόμα, με δεδομένα μεγαλύτερης χρονικής ανάλυσης (snpp-VIIRS Black Marble) μπορεί να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η αντίδραση των τοπικών κοινωνιών στις αποφάσεις γενικού απαγορευτικού κυκλοφορίας και στάσης του λιανικού εμπορίου.

#### **Ερευνητικό ερώτημα 9:**

Η συστηματική και συχνή, σε καθημερινή πλέον βάση, διάθεση δορυφορικών δεδομένων νυχτερινών φώτων δεν καλύπτει μόνο τις ελλείψεις που προκύπτουν από τις προκαθορισμένες επίσημες απογραφές αλλά αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την αποτύπωση βραχυχρόνιων φαινομένων όπως είναι η συμπεριφορά της πόλης και η αστική δραστηριότητα κατά την διάρκεια της εβδομάδας. Τα αποτελέσματα δείχνουν να αποκαλύπτουν λογική συμπεριφορά και αναμενόμενα φαινόμενα στον χώρο και τον χρόνο.

Με τον υπολογισμό των δεικτών  $\Delta 2$  και  $LQ2$  εκτιμήθηκε ότι το κέντρο της Αττικής κατά τους θερινούς μήνες (με εξαίρεση τον Ιούλιο) δείχνει να είναι επιφορτισμένο τα σαββατοκύριακα σε σχέση με τις καθημερινές. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι σε περιοχές β' κατοικίας (ανατολική Αττική) η αστική δραστηριότητα εντείνεται τα σαββατοκύριακα. Η πανδημία και τα επιβαλλόμενα περιοριστικά μέτρα το 2020 επηρέασαν την αστική δραστηριότητα κατά την διάρκεια της εβδομάδας όπου η αστική δραστηριότητα φαίνεται ενισχυμένη τις καθημερινές στο κέντρο της πόλης. Ιδιαίτερα γλαφυρή είναι επίσης η απόδοση της λειτουργία της πόλης κατά τις εορταστικές περιόδους όπως το Πάσχα που κατά τα έτη έρευνας εορτάζεται τον Απρίλη. Αποτυπώνεται χαρακτηριστικά τόσο η χωρική όσο και η χρονική διαφοροποίηση της αστικής δραστηριότητας (στο κέντρο αυξημένη δραστηριότητα τις καθημερινές, σε περιφερειακούς δήμους τα σαββατοκύριακα). Μάλιστα, το γενικό απαγορευτικό λόγω της πανδημίας το 2020 επηρέασε την τυπική λειτουργία της πόλης την περίοδο αυτή αφού συνέβαλε σε χωρική και ποσοτική πόλωση.

Μέσω της ακτινοβολίας των νυχτερινών φώτων, καταγράφηκε η χωροχρονική δια-

φοροποίηση της αστικής δραστηριότητας και η λειτουργία της πόλης κατά την διάρκεια του έτους και ουσιαστικά προτάθηκε εμπράκτως η επίλυση του ερευνητικού ερωτήματος E9. Στο κέντρο της Αττικής παρατηρείται απώλεια πληθυσμού κατά τον Αύγουστο ιδίως σε ένα τυπικό έτος όπως το 2019. Το 2020 έγιναν ορατές οι επιπτώσεις της πανδημίας και των σχετικών περιοριστικών μέτρων στην λειτουργία της πόλης αφού παρατηρήθηκε ότι περιοχές β' κατοικίας (ανατολική Αττική) εμφάνισαν αυξημένο πληθυσμό τον Αύγουστο σε σχέση με τον Μάρτιο αλλά και περιορισμός του κύματος εγκατάλειψης του κέντρου.

Συμπερασματικά, με την τρέχουσα έρευνα φαίνεται ότι τα νυχτερινά φώτα μπορούν να καταγράψουν βραχυχρόνιες τάσεις στην αστική δραστηριότητα και την κατανομή του πληθυσμού στον χώρο. Προσοχή θα πρέπει βέβαια να δίνεται στους τεχνικούς περιορισμούς και τους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την καταγραφή της εκπεμπόμενης νυχτερινής ακτινοβολίας (βλ. ενότητα 2.1.7).

Δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι στην τρέχουσα έρευνα η χωρική και χρονική κατανομή της αστικής δραστηριότητας εκτιμήθηκε αποκλειστικά και μόνο με την αξιοποίηση των δεδομένων νυχτερινών φώτων χωρίς να γίνει κάποιος έλεγχος εγκυρότητας των αποτελεσμάτων. Ένας από τους βασικότερους λόγους για την παράλειψη του έλεγχου εγκυρότητας των αποτελεσμάτων είναι η έλλειψη αντίστοιχων συμπληρωματικών/βοηθητικών δεδομένων. Ακόμα, πέραν από την εκτίμηση και περιγραφή των χωροχρονικών προτύπων της αστικής δραστηριότητας η έρευνα δεν επικεντρώθηκε στην αιτιολόγηση και τους μηχανισμούς δημιουργίας των προτύπων αυτών. Τα πρότυπα μετακίνησης και χωρικής κατανομής του πληθυσμού εξαρτώνται από ένα αλληλένδετο πλέγμα οικονομικών, κοινωνικών και γεωγραφικών παραγόντων και απαιτούν την θεώρηση μέσα από το πρίσμα των κλάδων της Περιφερειακής Οικονομικής ανάλυσης, της Πολιτικής Οικονομίας, της Κοινωνιολογίας, της Ανθρωπολογίας και της Οικονομικής Γεωγραφίας (Polyzos et al., 2013a).

#### **Ερευνητικό ερώτημα 10:**

Τέλος, η χρήση των δορυφορικών εικόνων ISS αποκάλυψε και στην πράξη, με συγκριτικό και πρακτικό τρόπο, τα προβλήματα και τους περιορισμούς των δεδομένων νυχτερινών φώτων. Τα πιο διαδεδομένα σύνολα και προϊόντα νυχτερινών φώτων (DMSP/OLS και snpp-VIIRS) είναι, με βάση την χωρική τους ανάλυση, ανεπαρκή να καλύψουν λεπτομερώς χωρικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε επίπεδο γειτονιάς ή οικοδομικού τετραγώνου. Κατά συνέπεια απαιτείται προσοχή κατά την χρήση τους και γνώση ότι τα



δεδομένα αυτά μπορούν να παρέχουν συνοπτική και συγκεντρωτική πληροφορία για το σύνολο της πόλης (ή επιμέρους εκτεταμένες περιοχές) χωρίς να αποκαλύπτονται λεπτομερώς ενδοαστικά φαινόμενα και τάσεις. Επιπλέον, δεν είναι εφικτό να διαχωρίσουν τις επιμέρους χρήσεις γης εντός του αστικού χώρου σαν συνέπεια του περιορισμένου μήκους φάσματος που μπορούν να καταγράψουν. Κατά συνέπεια, δεν θα πρέπει να αγνοούνται και οι υπόλοιπες διαθέσιμες πηγές δεδομένων (EROS-B, LJ1-01, JL1-3B και τα επικείμενα Unicorn-2A/AlbaOrbital, VIIRS Black Marble HD) με υψηλότερη χωρική ανάλυση όταν οι απαιτήσεις της έρευνας απαιτούν λεπτομερή ανάλυση του αστικού χώρου. Οι περιορισμοί αυτοί καταδεικνύουν ουσιαστικά και την αναγκαιότητα για την εκτόξευση ενός δορυφορικού συστήματος εξειδικευμένου για την παρακολούθηση των πόλεων. Ένα σύστημα τηλεπισκόπησης με μεγαλύτερη χωρική ανάλυση, επαρκές φασματικό εύρος που να καλύπτει και τις νέες τεχνολογίες φωτισμού και με χρόνο διέλευσης εγκαίρως και στην κορύφωση της νυχτερινής αστικής δραστηριότητας.

## 5.1 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Μέσω της τρέχουσας διατριβής επιχειρήθηκε μια ολοκληρωμένη χρήση των κυριότερων πηγών δεδομένων νυχτερινών φώτων. Αναγνωρίζοντας την αξία των δεδομένων DMSP/OLS και την μακροχρόνια εφαρμογή τους στα αστικά φαινόμενα προτάθηκε και εφαρμόστηκε μια μεθοδολογία αναβάθμισης της ποιότητάς τους. Η βελτίωση στηρίχτηκε στην χρήση συμπληρωματικών δεδομένων SAR και στόχο είχε τον περιορισμό του φαινομένου του κορεσμού (saturation) και της υπερλάμψης (overglow).

Τα δεδομένα DMSP/OLS χρησιμοποιήθηκαν και στην πράξη για την πρόβλεψη της έντασης της αστικής δραστηριότητας και την εξάπλωση των ελληνικών πόλεων στο μέλλον. Με αυτό τον τρόπο αναδείχτηκε η χρησιμότητα της μακράς χρονοσειράς που διαθέτουν, παρόλες τις τεχνικές αδυναμίες που αυτά έχουν.

Επιπλέον, με τις μεθόδους διόρθωσης της σεληνιακής ακτινοβολίας στα ημερήσια δεδομένα snpp-VIIRS προτάθηκε λύση σε ένα χρόνιο πρόβλημα που ταλανίζει την επιστημονική κοινότητα από το 2012. Μόλις πρόσφατα άρχισαν να δημοσιοποιούνται επίσημα διορθωμένα δεδομένα από το αρμόδιο επιστημονικό κέντρο (NASA Goddard Space Flight Center). Αποδείχτηκε ότι τα δεδομένα snpp-VIIRS έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογής στα αστικά φαινόμενα. Χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της φωτορύπανσης και αποδείχτηκε ότι τα αποτελέσματα του προτεινόμενου δείκτη είναι αξιόπιστα και συνάδουν με καθιερωμένα χωρικά πρότυπα στον Ελλαδικό χώρο. Η υπόθεση εργασίας ότι υπάρχει σημαντική συσχέτιση των νυχτερινών φώτων με οικονομικές μεταβλητές συνέβαλε στην εκτίμηση της εποχικότητας στον Ελλαδικό χώρο και την ανάδειξη χωρικών προτύπων. Επιπλέον, μέσω των νυχτερινών φώτων εκτιμήθηκε το ΑΕΠ σε επίπεδο NUTS 3 σε μηνιαία βάση επιβεβαιώνοντας την δυνατότητα τους να αποτελέσουν μια σημαντική υποκατάστατη μεταβλητή που μπορεί να προσφέρει δεδομένα ενδο-απογραφικά αλλά και σε περιπτώσεις που αυτά δεν είναι καθόλου διαθέσιμα ή επηρεάζονται από παράγοντες όπως η παραοικονομία. Και σε αυτή την περίπτωση, η μηνιαία διακύμανση του ΑΕΠ ταυτίζεται με επιβεβαιωμένα και γνωστά χωρικά πρότυπα στον ελλαδικό χώρο.

Τα δεδομένα νυχτερινών φώτων απέδειξαν και τις δυνατότητες εφαρμογής σε έκτακτες συνθήκες. Η υγειονομική κρίση της πανδημίας της COVID-19 ήταν μια καλή ευκαιρία για να αποδειχτεί ότι τα δεδομένα μπορούν να καταγράψουν τις συνέπειες εκτάκτων γεγονότων στην αστική δραστηριότητα. Με την πλήρη διάθεση των ημερήσιων δεδομένων η παρακολούθηση εκτάκτων συνθηκών και χρήσεων θα γίνονται σε σχεδόν πραγμα-

τικό χρόνο (near real time).

Τέλος μεγάλη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς του κάθε προϊόντος. Ο χρήστης πρέπει να έχει υπόψιν του όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα και αξιοπιστία των δεδομένων και ανάλογα την φύση της έρευνας να επιλέγει την βέλτιστη πηγή δεδομένων. Οι παράγοντες αυτοί δεν περιορίζονται μόνο σε τεχνικούς περιορισμούς (π.χ. ραδιομετρικό εύρος, περιοδικότητα λήψης, φασματικό εύρος) αλλά και σε εξωγενείς όπως καιρικές συνθήκες, σεληνιακή παρεμβολή αλλά και πολιτικές μετάβασης σε νέες τεχνολογίες φωτισμού. Εκτός από τις πιο δημοφιλείς πηγές δεδομένων, που είναι και ελεύθερα διαθέσιμες, δεν πρέπει να αγνοούνται και οι εμπορικές πηγές διάθεσης δεδομένων.

Με την ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, προβλέπεται η έλευση νέας γενιάς (μικρο) δορυφόρων που θα επιτρέπουν το σχεδιασμό συστημάτων προσαρμοσμένων στις έρευνες αστικής φύσεως, θα βασίζονται στον συμμετοχικό σχεδιασμό (βλ. ΕΛ/ΛΑΚ και ομότιμο κίνημα), τις νέες συνθήκες χρηματοδότης έρευνας και ανάπτυξης (μέσω πληθοπορισμού) και την ευχέρεια αποστολής στο διάστημα. Σε συνδυασμό με νέες, αναδυόμενες τεχνολογίες (big data, τεχνητή νοημοσύνη, blockchain) και την εξέλιξη υπερ-υπολογιστικών υποδομών (quantum computing, high-performance computing) τα νυχτερινά δεδομένα, ως μια ιδιαίτερη κατηγορία δεδομένων, θα κληθούν να διαδραματίσουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην παρακολούθηση της αστικοποίησης, την καταγραφή των αστικών φαινομένων και την διαχείριση των κρίσεων, ανθρωπιστικών ή περιβαλλοντικών.

## Βιβλιογραφία

- Abdelhamid, H., (2004) “Urban Change in Cairo”, in: *Environmental Challenges in the Mediterranean 2000–2050*. Ed. by A. Marquina. Dordrecht: Springer Netherlands, 331–344.
- Addison, D. M., Stewart, B., (2015) “Nighttime Lights Revisited: The Use of Nighttime Lights Data as a Proxy for Economic Variables”, *World Bank Policy Research Working Paper*, (7496).
- Aithal, B., Shivamurthy, V., Ramachandra, T. V., (2017) “Characterization and Visualization of Spatial Patterns of Urbanisation and Sprawl through Metrics and Modeling”, *Cities and the Environment (CATE)*, **10** (1).
- Alba Orbital (2019). Alba Orbital. URL: <http://www.albaorbital.com> (visited on 03/15/2021).
- Amaral, S., Monteiro, A. M. V., Camara, G., Quintanilha, J. A., (2006) “DMSP/OLS Night-Time Light Imagery for Urban Population Estimates in the Brazilian Amazon”, *International Journal of Remote Sensing*, **27** (5), 855–870.
- Amaral, S., Camara, G., Monteiro, A. M. V., Quintanilha, J. A., Elvidge, C. D., (2005) “Estimating Population and Energy Consumption in Brazilian Amazonia Using DMSP Night-Time Satellite Data”, *Computers, Environment and Urban Systems*, **29** (2), 179–195.
- Apollo Mapping, (2019) Jilin-1 – The Nighttime Color, High-Resolution Satellite Imagery Solution! Apollo Mapping. URL: <https://apollomapping.com/blog/jilin-1-the-nighttime-color-high-resolution-satellite-imagery-solution> (visited on 03/15/2021).
- Aubrecht, C., Elvidge, C. D., Longcore, T., Rich, C., Safran, J., Strong, A. E., Eakin, C. M., Baugh, K. E., Tuttle, B. T., Howard, A. T., Erwin, E. H., (2008) “A Global Inventory of Coral Reef Stressors Based on Satellite Observed Nighttime Lights”, *Geocarto International*, **23** (6), 467–479.
- Bagan, H., Yamagata, Y., (2015) “Analysis of Urban Growth and Estimating Population Density Using Satellite Images of Nighttime Lights and Land-Use and Population Data”, *GIScience & Remote Sensing*, **52** (6), 765–780.
- Bará, S., Rodríguez-Arós, Á., Pérez, M., Tosar, B., Lima, R., Sánchez de Miguel, A., Zamorano, J., (2019) “Estimating the Relative Contribution of Streetlights, Vehicles,

- and Residential Lighting to the Urban Night Sky Brightness”, *Lighting Research & Technology*, **51** (7), 1092–1107.
- Baris, M. E., Erdogan, E., Dilaver, Z., Arslan, M., (2010) “Greenways and the Urban Form: City of Ankara, Turkey”, *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, **24** (1), 1657–1664.
- Baugh, K., Elvidge, C. D., Ghosh, T., Ziskin, D., (2010) “Development of a 2009 Stable Lights Product Using DMSP-OLS Data”, *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, **30** (0), 114.
- Baugh, K., Hsu, F.-C., Elvidge, C. D., Zhizhin, M., (2013) “Nighttime Lights Compositing Using the VIIRS Day-Night Band: Preliminary Results”, *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, **35** (0), 70.
- Bhatta, B., Saraswati, S., Bandyopadhyay, D., (2010) “Urban Sprawl Measurement from Remote Sensing Data”, *Applied Geography*, **30** (4), 731–740.
- Bickenbach, F., Bode, E., Nunnenkamp, P., Söder, M., (2016) “Night Lights and Regional GDP”, *Review of World Economics*, **152** (2), 425–447.
- Bihanta, N., Soffianian, A., Fakheran, S., Gholamalifard, M., (2015) “Using the SLEUTH Urban Growth Model to Simulate Future Urban Expansion of the Isfahan Metropolitan Area, Iran”, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **43** (2), 407–414.
- Bokaie, M., Zarkesh, M. K., Arasteh, P. D., Hosseini, A., (2016) “Assessment of Urban Heat Island Based on the Relationship between Land Surface Temperature and Land Use/ Land Cover in Tehran”, *Sustainable Cities and Society*, **23**, 94–104.
- Bustamante-Calabria, M., de Miguel, A. S., Martín-Ruiz, S., Ortiz, J.-L., Vilchez, J. M., Pelegrina, A., García, A., Zamorano, J., Bennie, J., Gaston, K. J., (2020) Effects of the COVID-19 Lockdown on Urban Light Emissions: Ground and Satellite Comparison. arXiv: 2011.09252. URL: <http://arxiv.org/abs/2011.09252> (visited on 11/22/2020).
- Campbell, J. B., Wynne, R. H., (2011) “Introduction to Remote Sensing”, 5th ed. New York: Guilford Press. 667 pp.
- Candau, J. T., (2002) “Temporal Calibration Sensitivity of the SLEUTH Urban Growth Model”, Santa Barbara: University of California. 258 pp.
- Cao, C., Bai, Y., (2014) “Quantitative Analysis of VIIRS DNB Nightlight Point Source for Light Power Estimation and Stability Monitoring”, *Remote Sensing*, **6** (12), 11915–11935.

- Cao, C., Shao, X., Uprety, S., (2013) “Detecting Light Outages After Severe Storms Using the S-NPP/VIIRS Day/Night Band Radiances”, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **10** (6), 1582–1586.
- Cauwels, P., Pestalozzi, N., Sornette, D., (2014) “Dynamics and Spatial Distribution of Global Nighttime Lights”, *EPJ Data Science*, **3** (1), 2.
- Chalkias, C., Petrakis, M., Psiloglou, B., Lianou, M., (2006) “Modelling of Light Pollution in Suburban Areas Using Remotely Sensed Imagery and GIS”, *Journal of Environmental Management*, **79** (1), 57–63.
- Chand, T. R. K., Badarinath, K. V. S., Elvidge, C. D., Tuttle, B. T., (2009) “Spatial Characterization of Electrical Power Consumption Patterns over India Using Temporal DMSP-OLS Night-Time Satellite Data”, *International Journal of Remote Sensing*, **30** (3), 647–661.
- Chaudhuri, G., Clarke, K., (2013) “The SLEUTH Land Use Change Model: A Review”, *Environmental Resources Research*, **1** (1).
- Chen, X., Nordhaus, W. D., (2011) “Using Luminosity Data as a Proxy for Economic Statistics”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **108** (21), 8589–8594.
- Chepesiuk, R., (2009) “Missing the Dark: Health Effects of Light Pollution”, *Environmental Health Perspectives*, **117** (1).
- Churkina, N., Zaverskiy, S., (2017) “Challenges of Strong Concentration in Urbanization: The Case of Moscow in Russia”, *Procedia Engineering*, **198**, 398–410.
- Cinzano, P., Elvidge, C. D., (2004) “Night Sky Brightness at Sites from DMSP-OLS Satellite Measurements”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **353** (4), 1107–1116.
- Cinzano, P., Falchi, F., Elvidge, C., (2001) “The First World Atlas of the Artificial Night Sky Brightness”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **328** (3), 689–707.
- Clarke, K. C., Hoppen, S., Gaydos, L., (1997) “A Self-Modifying Cellular Automaton Model of Historical Urbanization in the San Francisco Bay Area”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, **24** (2), 247–261.
- Clarke, K. C., (2008) “A Decade of Cellular Urban Modeling with SLEUTH: Unresolved Issues and Problems”, in: *Chapter 3, Planning Support Systems for Cities and Regions*. Ed. by R. Brail. Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy, 47–60.

- Clarke, K. C., Gaydos, L. J., (1998) “Loose-Coupling a Cellular Automaton Model and GIS: Long-Term Urban Growth Prediction for San Francisco and Washington/Baltimore”, *International Journal of Geographical Information Science*, **12** (7), 699–714.
- Coesfeld, J., Anderson, S., Baugh, K., Elvidge, C., Schernthanner, H., Kyba, C., (2018) “Variation of Individual Location Radiance in VIIRS DNB Monthly Composite Images”, *Remote Sensing*, **10** (12), 1964.
- Cole, T., Wanik, D., Molthan, A., Román, M., Griffin, R., (2017) “Synergistic Use of Nighttime Satellite Data, Electric Utility Infrastructure, and Ambient Population to Improve Power Outage Detections in Urban Areas”, *Remote Sensing*, **9** (3), 286.
- Commision, E., (2020) Tourism and Transport in 2020 and beyond – European Sources Online. URL: <https://www.europeansources.info/record/tourism-and-transport-in-2020-and-beyond/> (visited on 01/18/2021).
- Couclelis, H., (1997) “From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, **24** (2), 165–174.
- D’Urso, A., (2011) “Urban Settlement Process in Sicily: From History to the Contemporary Period”, *Review of Historical Geography and Toponomastics*, **VI** (11-12), 15–29.
- De Miguel, A. S., Castano, J. G., Zamorano, J., Pascual, S., Angeles, M., Cayuela, L., Martinez, G. M., Challupner, P., Kyba, C. C. M., (2014) “Atlas of Astronaut Photos of Earth at Night”, *Astronomy & Geophysics*, **55** (4), 4.36–4.36.
- Del Castillo, E. M. A., Crawford, D. L., Davis, D. R., (2003) “Preserving Our Nighttime Environment: A Global Approach”, in: *Light Pollution: The Global View*. Ed. by H. E. Schwarz. Vol. 284. Astrophysics and Space Science Library. Dordrecht: Springer Netherlands, 49–67.
- Dickinson, L. G., Service, H. A. W., Capt. S. Edward Boselly III, Capt. Walter S. Burgmann, USAFSAAS, Dept. of Weather Training, (1974) Defence Meteorological Satellite Program (DMSP) User’s Guide. AWS TR-74-250. Illinois: Air Weather Service (MAC)- United States Air Force, 109.

- Duriscoe, D. M., Anderson, S. J., Luginbuhl, C. B., Baugh, K. E., (2018) “A Simplified Model of All-Sky Artificial Sky Glow Derived from VIIRS Day/Night Band Data”, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **214**, 133–145.
- Duriscoe, D. M., Luginbuhl, C. B., Moore, C. A., (2007) “Measuring NightSky Brightness with a WideField CCD Camera”, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **119** (852), 192–213.
- Earth Science and Remote Sensing Unit, N. J. S. C., (2000) Gateway to Astronaut Photography of Earth. URL: <https://eol.jsc.nasa.gov/> (visited on 04/06/2020).
- Elshorbany, Y. F., Kapper, H. C., Ziemke, J. R., Parr, S. A., (2021) “The Status of Air Quality in the United States During the COVID-19 Pandemic: A Remote Sensing Perspective”, *Remote Sensing*, **13** (3), 369.
- Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Kihn, E. A., Kroehl, H. W., Davis, E. R., Davis, C. W., (1997a) “Relation between Satellite Observed Visible-near Infrared Emissions, Population, Economic Activity and Electric Power Consumption”, *International Journal of Remote Sensing*, **18** (6), 1373–1379.
- Elvidge, C. D., Cinzano, P., Pettit, D. R., Arvesen, J., Sutton, P., Small, C., Nemani, R., Longcore, T., Rich, C., Safran, J., Weeks, J., Ebener, S., (2007) “The Nightsat Mission Concept”, *International Journal of Remote Sensing*, **28** (12), 2645–2670.
- Elvidge, C. D., Sutton, P. C., Baugh, K., Ziskin, D. C., Ghosh, T., Anderson, S., (2011) “National Trends in Satellite Observed Lighting: 1992-2009”, in: *AGU Fall Meeting Abstracts*. Vol. 1. Washington, DC, USA: American Geophysical Union, 3.
- Elvidge, C. D., Baugh, K. E., Zhizhin, M., Hsu, F.-C., (2013) “Why VIIRS Data Are Superior to DMSP for Mapping Nighttime Lights”, *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, **35** (0), 62.
- Elvidge, C. D., Imhoff, M. L., Baugh, K. E., Hobson, V. R., Nelson, I., Safran, J., Dietz, J. B., Tuttle, B. T., (2001) “Night-Time Lights of the World: 1994–1995”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **56** (2), 81–99.
- Elvidge, C. D., Sutton, P. C., Ghosh, T., Tuttle, B. T., Baugh, K. E., Bhaduri, B., Bright, E., (2009a) “A Global Poverty Map Derived from Satellite Data”, *Computers & Geosciences*, **35** (8), 1652–1660.



- Elvidge, C. D., Ziskin, D., Baugh, K. E., Tuttle, B. T., Ghosh, T., Pack, D. W., Erwin, E. H., Zhizhin, M., (2009b) “A Fifteen Year Record of Global Natural Gas Flaring Derived from Satellite Data”, *Energies*, **2** (3), 595–622.
- Elvidge, C. D., Baugh, K., Zhizhin, M., Hsu, F. C., Ghosh, T., (2017) “VIIRS Night-Time Lights”, *International Journal of Remote Sensing*, **38** (21), 5860–5879.
- Elvidge, C., Baugh, K., Kihn, E., Kroehl, H., Davis, E., (1997b) “Mapping City Lights with Nighttime Data from the DMSP Operational Linescan System”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **63**, 727–734.
- Elvidge, C., Hsu, F.-C., Baugh, K., Ghosh, T., (2014) “National Trends in Satellite-Observed Lighting: 1992–2012”, in: *Global Urban Monitoring and Assessment through Earth Observation*. Ed. by Q. Weng. Vol. 20144266. CRC Press, 97–120.
- Enenkel, M., Shrestha, R. M., Stokes, E., Roman, M., Wang, Z., Espinosa, M. T. M., Hajzmanova, I., Ginnetti, J., Vinck, P., (2019) “Emergencies Do Not Stop at Night: Advanced Analysis of Displacement Based on Satellite-Derived Nighttime Light Observations”, *IBM Journal of Research and Development*. Transdisciplinary, 1–1.
- Esbah, H., Maktav, D., Levent Atatanir, Erbekb, F. S., Menderes, A., (2005) “Understanding Urban Growth Patterns: A Landscape Ecology Point of View”, in: *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas (URS)*. Ed. by M. Moeller, E. Wentz. Vol. XXXVI-8/W27. Tempe, AZ, USA: ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing), 7.
- European Environment Agency, (2018) Corine Land Cover. Copernicus Land Monitoring Service. URL: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/> (visited on 12/11/2020).
- Falchi, F., Furgoni, R., Gallaway, T., Rybnikova, N., Portnov, B., Baugh, K., Cinzano, P., Elvidge, C., (2019) “Light Pollution in USA and Europe: The Good, the Bad and the Ugly”, *Journal of Environmental Management*, **248**, 109227.
- Fan, X., Nie, G., Deng, Y., An, J., Zhou, J., Li, H., (2019) “Rapid Detection of Earthquake Damage Areas Using VIIRS Nearly Constant Contrast Night-Time Light Data”, *International Journal of Remote Sensing*, **40**, 1–24.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M.,

- Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D., (2007) “The Shuttle Radar Topography Mission”, *Reviews of Geophysics*, **45** (2).
- Frolking, S., Milliman, T., Seto, K. C., Friedl, M. A., (2013) “A Global Fingerprint of Macro-Scale Changes in Urban Structure from 1999 to 2009”, *Environmental Research Letters*, **8** (2), 024004.
- Fu, D., Xia, X., Duan, M., Zhang, X., Li, X., Wang, J., Liu, J., (2018) “Mapping Nighttime PM2.5 from VIIRS DNB Using a Linear Mixed-Effect Model”, *Atmospheric Environment*, **178**, 214–222.
- Gallaway, T., (2010) “On Light Pollution, Passive Pleasures, and the Instrumental Value of Beauty”, *Journal of Economic Issues*, **44** (1), 71–88.
- Gallaway, T., Olsen, R. N., Mitchell, D. M., (2010) “The Economics of Global Light Pollution”, *Ecological Economics*, **69** (3), 658–665.
- Garcia-Saenz, A., Sánchez de Miguel, A., Espinosa, A., Valentin, A., Aragonés, N., Llorca, J., Amiano, P., Martín Sánchez, V., Guevara, M., Capelo, R., Tardón, A., Peiró-Perez, R., Jiménez-Moleón, J. J., Roca-Barceló, A., Pérez-Gómez, B., Dierssen-Sotos, T., Fernández-Villa, T., Moreno-Iribas, C., Moreno, V., García-Pérez, J., Castaño-Vinyals, G., Pollán, M., Aubé, M., Kogevinas, M., (2018) “Evaluating the Association between Artificial Light-at-Night Exposure and Breast and Prostate Cancer Risk in Spain (MCC-Spain Study)”, *Environmental Health Perspectives*, **126** (04), 047011.
- Gibson, J., Olivia, S., Boe-Gibson, G., (2019) A Test of DMPS and VIIRS Night Lights Data for Estimating GDP and Spatial Inequality for Rural and Urban Areas. Working Papers in Economics 19/11. University of Waikato.
- Gitas, I. Z., Polychronaki, A., Katagis, T., Mallinis, G., (2008) “Contribution of Remote Sensing to Disaster Management Activities: A Case Study of the Large Fires in the Peloponnese, Greece”, *International Journal of Remote Sensing*, **29** (6), 1847–1853.
- Gitas, I. Z., Mitri, G. H., Ventura, G., (2004) “Object-Based Image Classification for Burned Area Mapping of Creus Cape, Spain, Using NOAA-AVHRR Imagery”, *Remote Sensing of Environment*, **92** (3), 409–413.
- Goldstein, N., Dietzel, C., Clarke, K., (2005) “Don’t Stop ’til You Get Enough–Sensitivity Testing of Monte Carlo Iterations for Model Calibration”, in: *Proceedings, 8th International Conference on GeoComputation*. GeoComputation CD-ROM.

- Grubisic, M., Haim, A., Bhusal, P., Dominoni, D. M., Gabriel, K. M. A., Jechow, A., Kupprat, F., Lerner, A., Marchant, P., Riley, W., Stebelova, K., van Grunsven, R. H. A., Zeman, M., Zubidat, A. E., Hölker, F., (2019) “Light Pollution, Circadian Photoreception, and Melatonin in Vertebrates”, *Sustainability*, **11** (22), 6400.
- Hadjipetrou, S., Stathakis, D., (2019) “Monitoring Urbanization Dynamics in Cyprus Using Time-Series DMSP / OLS Nightlight Imagery”, in: *Geospatial Technologies for Local and Regional Development : Proceedings of the 22nd AGILE Conference on Geographic Information Science, Limassol, Cyprus*. Ed. by P. Kyriakidis, D. Hadjimitsis, D. Skarlatos, A. Mansourian. Cham, Switzerland: Springer.
- Henderson, J. V., Storeygard, A., Weil, D. N., (2012) “Measuring Economic Growth from Outer Space”, *American Economic Review*, **102** (2), 994–1028.
- Hölker, F., Moss, T., Griefahn, B., Kloas, W., Voigt, C. C., Henckel, D., Hänel, A., Kappeler, P. M., Völker, S., Schwöpe, A., Franke, S., Uhrlandt, D., Fischer, J., Klenke, R., Wolter, C., Tockner, K., (2010) “The Dark Side of Light: A Transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy”, **15** (4).
- Hsu, F.-C., Baugh, K., Ghosh, T., Zhizhin, M., Elvidge, C., (2015) “DMSP-OLS Radiance Calibrated Nighttime Lights Time Series with Intercalibration”, *Remote Sensing*, **7** (2), 1855–1876.
- Huang, Q., Yang, X., Gao, B., Yang, Y., Zhao, Y., (2014) “Application of DMSP/OLS Nighttime Light Images: A Meta-Analysis and a Systematic Literature Review”, *Remote Sensing*, **6** (8), 6844–6866.
- Hyndman, R., Athanasopoulos, G., (2014) “Forecasting: Principles and Practice”, Melbourne, Australia: OTexts.
- Imhoff, M. L., Lawrence, W. T., Elvidge, C. D., Paul, T., Levine, E., Privalsky, M. V., Brown, V., (1997a) “Using Nighttime DMSP/OLS Images of City Lights to Estimate the Impact of Urban Land Use on Soil Resources in the United States”, *Remote Sensing of Environment*, **59** (1), 105–117.
- Imhoff, M., Lawrence, W. T., Stutzer, D. C., Elvidge, C. D., (1997b) “A Technique for Using Composite DMSP/OLS “City Lights” Satellite Data to Map Urban Area”, *Remote Sensing of Environment*, **61** (3), 361–370.

- Jaber, S. M., (2020) “Is There a Relationship between Human Population Distribution and Land Surface Temperature? Global Perspective in Areas with Different Climatic Classifications”, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **20**, 100435.
- Janiczek, P. M., DeYoung, J. A., United States Naval Observatory., (1987) “Computer Programs for Sun and Moon Illuminance: With Contingent Tables and Diagrams”, United States Naval Observatory Circular.No. 171. Washington, D.C.: U.S. Naval Observatory, Nautical Almanac Office. 132 p.
- Jensen, J. R., (2016) “Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective”, Pearson Series in Geographic Information Science. Glenview, IL: Pearson Education, Inc.
- Ji, W., (2008) “Landscape Effects of Urban Sprawl: Spatial and Temporal Analyses Using Remote Sensing Images and Landscape Metrics”, in: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII-Part B7. Beijing, 1691–1694.
- Ji, W., Ma, J., Twibell, R. W., Underhill, K., (2006) “Characterizing Urban Sprawl Using Multi-Stage Remote Sensing Images and Landscape Metrics”, *Computers, Environment and Urban Systems*, **30** (6), 861–879.
- Jing, W., Yang, Y., Yue, X., Zhao, X., (2015) “Mapping Urban Areas with Integration of DMSP/OLS Nighttime Light and MODIS Data Using Machine Learning Techniques”, *Remote Sensing*, **7** (9), 12419–12439.
- Johansen, A., (2010) “Monte Carlo Methods”, in: *International Encyclopedia of Education*. Ed. by P. Peterson, E. Baker, B. McGaw. Elsevier, 296–303.
- JPSS Ground System, (2015) Joint Polar Satellite System (JPSS) Ground Project Code 474.474-00448-02-06-B0200-Joint Polar Satellite System (JPSS) Algorithm Specification Volume II: Data Dictionary for VIIRS RDR/SDR Block 2.0.0. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.
- JPSS Ground System, (2016) Joint Polar Satellite System (JPSS) Ground Project Code 474/474-00448-02-11-B0200, Joint Polar Satellite System (JPSS) Algorithm Specification, Volume II: Data, Dictionary for the Cloud Mask, Block 2.0.0. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.

- Kaimaris, D., Patias, P., (2016) “Population Estimation in an Urban Area with Remote Sensing and Geographical Information Systems”, *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, **5** (1), 1795–1812.
- Kaplan, H., (2003) “Lighting for a Secure and Safe Night-Time Environment”, in: *Light Pollution: The Global View*. Ed. by H. E. Schwarz. Vol. 284. Astrophysics and Space Science Library. Dordrecht: Springer Netherlands, 169–173.
- Katz, Y., Levin, N., (2016) “Quantifying Urban Light Pollution - A Comparison between Field Measurements and EROS-B Imagery”, *Remote Sensing of Environment*, **177**, 65–77.
- Kerenyi, N., Pandula, E., Feuer, G., (1990) “Why the Incidence of Cancer Is Increasing: The Role of ‘Light Pollution’”, *Medical Hypotheses*, **33** (2), 75–78.
- Kirschbaum, C., (2003) “Research on the Impact of Lighting on Environment and Humans”, in: *Light Pollution: The Global View*. Ed. by H. E. Schwarz. Vol. 284. Astrophysics and Space Science Library. Dordrecht: Springer Netherlands, 201–214.
- Kloog, I., Haim, A., Stevens, R. G., Portnov, B. A., (2009) “Global Co-Distribution of Light at Night (LAN) and Cancers of Prostate, Colon, and Lung in Men”, *Chronobiology International*, **26** (1), 108–125.
- Kohiyama, M., Hayashi, H., Maki, N., Higashida, M., Kroehl, H. W., Elvidge, C. D., Hobson, V. R., (2004) “Early Damaged Area Estimation System Using DMSP-OLS Night-Time Imagery”, *International Journal of Remote Sensing*, **25** (11), 2015–2036.
- Kotarba, A. Z., Aleksandrowicz, S., (2016) “Impervious Surface Detection with Nighttime Photography from the International Space Station”, *Remote Sensing of Environment*, **176**, 295–307.
- Kuechly, H. U., Kyba, C. C., Ruhtz, T., Lindemann, C., Wolter, C., Fischer, J., Hölker, F., (2012) “Aerial Survey and Spatial Analysis of Sources of Light Pollution in Berlin, Germany”, *Remote Sensing of Environment*, **126**, 39–50.
- Kuffer, M., Sliuzas, R., van Maarseveen, M., Pfeffer, K., Baud, I., (2017) “City Nighttime Light Variations Using ISS Images”, in: *2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. 2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE). Dubai, United Arab Emirates: IEEE, 1–4.

- Kyba, C. C. M., Ruhtz, T., Fischer, J., Hölker, F., (2012) “Red Is the New Black: How the Colour of Urban Skyglow Varies with Cloud Cover: Red Is the New Black”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **425** (1), 701–708.
- Kyba, C. C. M., Kuester, T., Kuechly, H. U., (2017a) “Changes in Outdoor Lighting in Germany from 2012-2016”, *International Journal of Sustainable Lighting*, **19** (2), 112.
- Kyba, C. C. M., Kuester, T., Sánchez de Miguel, A., Baugh, K., Jechow, A., Hölker, F., Bennie, J., Elvidge, C. D., Gaston, K. J., Guanter, L., (2017b) “Artificially Lit Surface of Earth at Night Increasing in Radiance and Extent”, *Science Advances*, **3** (11), e1701528.
- Kyba, C. C. M., Mohar, A., Pintar, G., Stare, J., (2018) “Reducing the Environmental Footprint of Church Lighting: Matching Façade Shape and Lowering Luminance with the EcoSky LED”, *International Journal of Sustainable Lighting*, **20** (1), 1.
- Kyba, C. C. M., Ruhtz, T., Fischer, J., Hölker, F., (2011) “Cloud Coverage Acts as an Amplifier for Ecological Light Pollution in Urban Ecosystems”, *PLoS ONE*, **6** (3). Ed. by J. Añel, e17307.
- Kyba, C. C. M., Ruhtz, T., Lindemann, C., Fischer, J., Hölker, F., (2013a) “Two Camera System for Measurement of Urban Uplight Angular Distribution”, in: *Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean (IRS2012)*, AIP Conf. Proc. 1531. Dahlem Cube, Free University, Berlin, 568–571.
- Kyba, C. C. M., Wagner, J. M., Kuechly, H. U., Walker, C. E., Elvidge, C. D., Falchi, F., Ruhtz, T., Fischer, J., Hölker, F., (2013b) “Citizen Science Provides Valuable Data for Monitoring Global Night Sky Luminance”, *Scientific Reports*, **3** (1).
- Kyba, C., Garz, S., Kuechly, H., de Miguel, A., Zamorano, J., Fischer, J., Hölker, F., (2014) “High-Resolution Imagery of Earth at Night: New Sources, Opportunities and Challenges”, *Remote Sensing*, **7** (1), 1–23.
- Lan, T., Shao, G., Tang, L., Xu, Z., Zhu, W., Liu, L., (2021) “Quantifying Spatiotemporal Changes in Human Activities Induced by COVID-19 Pandemic Using Daily Nighttime Light Data”, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **14**, 2740–2753.
- Lazar, M., (2010) “Shedding Light on the Global Distribution of Economic Activity”, *The Open Geography Journal*, **3** (1), 147–160.

- Lee, T. E., Miller, S. D., Turk, F. J., Schueler, C., Julian, R., Deyo, S., Dills, P., Wang, S., (2006) “The NPOESS VIIRS Day/Night Visible Sensor”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **87** (2), 191–199.
- Levin, N., (2017) “The Impact of Seasonal Changes on Observed Nighttime Brightness from 2014 to 2015 Monthly VIIRS DNB Composites”, *Remote Sensing of Environment*, **193**, 150–164.
- Levin, N., Duke, Y., (2012) “High Spatial Resolution Night-Time Light Images for Demographic and Socio-Economic Studies”, *Remote Sensing of Environment*, **119**, 1–10.
- Levin, N., Johansen, K., Hacker, J. M., Phinn, S., (2014) “A New Source for High Spatial Resolution Night Time Images - The EROS-B Commercial Satellite”, *Remote Sensing of Environment*, **149**, 1–12.
- Li, X., Li, D., (2014) “Can Night-Time Light Images Play a Role in Evaluating the Syrian Crisis?”, *International Journal of Remote Sensing*, **35** (18), 6648–6661.
- Li, X., Ma, R., Zhang, Q., Li, D., Liu, S., He, T., Zhao, L., (2019) “Anisotropic Characteristic of Artificial Light at Night – Systematic Investigation with VIIRS DNB Multi-Temporal Observations”, *Remote Sensing of Environment*, **233**, 111357.
- Li, X., Zhao, L., Li, D., Xu, H., (2018) “Mapping Urban Extent Using LuoJia 1-01 Nighttime Light Imagery”, *Sensors*, **18** (11), 3665.
- Liu, L., Tang, L., (2017) “Measuring Urban Sprawl in China by Night Time Light Images”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **52**, 012111.
- Liu, Q., Sha, D., Liu, W., Houser, P., Zhang, L., Hou, R., Lan, H., Flynn, C., Lu, M., Hu, T., Yang, C., (2020) “Spatiotemporal Patterns of COVID-19 Impact on Human Activities and Environment in Mainland China Using Nighttime Light and Air Quality Data”, *Remote Sensing*, **12** (10), 1576.
- Liu, Q., Sutton, P. C., Elvidge, C. D., (2011) “Relationships between Nighttime Imagery and Population Density for Hong Kong”, *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, **31** (0), 79.
- Liu, Z., He, C., Zhang, Q., Huang, Q., Yang, Y., (2012) “Extracting the Dynamics of Urban Expansion in China Using DMSP-OLS Nighttime Light Data from 1992 to 2008”, *Landscape and Urban Planning*, **106** (1), 62–72.

- Ma, L., Wu, J., Li, W., Peng, J., Liu, H., (2014a) “Evaluating Saturation Correction Methods for DMSP/OLS Nighttime Light Data: A Case Study from China’s Cities”, *Remote Sensing*, **6** (10), 9853–9872.
- Ma, T., Zhou, C., Pei, T., Haynie, S., Fan, J., (2014b) “Responses of Suomi-NPP VIIRS-Derived Nighttime Lights to Socioeconomic Activity in China’s Cities”, *Remote Sensing Letters*, **5** (2), 165–174.
- Ma, T., Zhou, Y., Wang, Y., Zhou, C., Haynie, S., Xu, T., (2014c) “Diverse Relationships between Suomi-NPP VIIRS Night-Time Light and Multi-Scale Socioeconomic Activity”, *Remote Sensing Letters*, **5** (7), 652–661.
- Magidi, J., Ahmed, F., (2018) “Assessing Urban Sprawl Using Remote Sensing and Landscape Metrics: A Case Study of City of Tshwane, South Africa (1984–2015)”, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, **22** (3), 335–346.
- Mann, M., Melaas, E., Malik, A., (2016) “Using VIIRS Day/Night Band to Measure Electricity Supply Reliability: Preliminary Results from Maharashtra, India”, *Remote Sensing*, **8** (9), 711.
- Mellander, C., Lobo, J., Stolarick, K., Matheson, Z., (2015) “Night-Time Light Data: A Good Proxy Measure for Economic Activity?”, *PLOS ONE*, **10** (10). Ed. by G. J.-P. Schumann, e0139779.
- Miller, S., Turner, R., (2009) “A Dynamic Lunar Spectral Irradiance Data Set for NPOESS/VIIRS Day/Night Band Nighttime Environmental Applications”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **47** (7), 2316–2329.
- Mills, S., Weiss, S., Liang, C., (2013) “VIIRS Day/Night Band (DNB) Stray Light Characterization and Correction”, in: ed. by J. J. Butler, X. (Xiong, X. Gu, 88661P.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, (2010) Joint Polar Satellite System, Mission and Instruments. URL: [https://www.jpss.noaa.gov/mission\\_and\\_instruments.html](https://www.jpss.noaa.gov/mission_and_instruments.html) (visited on 05/19/2019).
- Natural Earth-Free Vector and Raster Map Data at 1:10m, 1:50m, and 1:110m Scales (2009–2021) Natural Earth-Free Vector and Raster Map Data at 1:10m, 1:50m, and 1:110m Scales. URL: <https://www.naturalearthdata.com/> (visited on 03/03/2021).
- Navara, K. J., Nelson, R. J., (2007) “The Dark Side of Light at Night: Physiological, Epidemiological, and Ecological Consequences”, *Journal of Pineal Research*, **43** (3), 215–224.



- Nghiem, S., Balk, D., Rodriguez, E., Neumann, G., Sorichetta, A., Small, C., Elvidge, C., (2009) “Observations of Urban and Suburban Environments with Global Satellite Scatterometer Data”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64** (4), 367–380.
- Ngo, P.-T., Hoang, N.-D., Pradhan, B., Nguyen, Q., Tran, X., Nguyen, Q., Nguyen, V., Samui, P., Tien Bui, D., (2018) “A Novel Hybrid Swarm Optimized Multilayer Neural Network for Spatial Prediction of Flash Floods in Tropical Areas Using Sentinel-1 SAR Imagery and Geospatial Data”, *Sensors*, **18** (11), 3704.
- NOAA, (2017) NOAA Technical Report NESDIS 142 - Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Sensor Data Record (SDR) User’s Guide Version 1.3. U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE National Oceanic and Atmospheric Administration National Environmental Satellite, Data, and Information Service.
- NOAA, (2018) NOAA’s Comprehensive Large Array-Data Stewardship System. URL: <https://www.bou.class.noaa.gov/saa/products/welcome> (visited on 09/03/2018).
- NOAA National Geophysical Data Center, D. M. S. P. (, (2013) Global DMSP-OLS Nighttime Lights Time Series 1992 - 2013 (Version 4). Earth Observation Group - Defense Meteorological Satellite Program, Boulder | [ngdc.noaa.gov](https://ngdc.noaa.gov). URL: <https://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html> (visited on 12/12/2016).
- NOAA Defense Meteorological Satellite Program (DMSP), N. G. D. C., (2016) Version 1 Nighttime VIIRS Day/Night Band Composites. Earth Observation Group - Defense Meteorological Satellite Program, Boulder | [ngdc.noaa.gov](https://ngdc.noaa.gov). URL: <https://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html> (visited on 12/12/2016).
- Nurbandi, W., Yusuf, F. R., Prasetya, R., Afrizal, M. D., (2016) “Using Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Imagery to Identify and Analyze Light Pollution”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **47**, 012040.
- Openshaw, S., Taylor, P. J., (1979) “A Million or so Correlation Coefficients: Three Experiments on the Modifiable Areal Unit Problem”, in: *Statistical Applications in the Spatial Sciences*. Ed. by N. Wrigley. London: Pion, 127–144.
- OpenStreetMap contributors, (2019) Full History Planet PBF File. URL: <https://planet.openstreetmap.org/planet/full-history/> (visited on 05/22/2019).

- Pafi, M., Chalkias, C., Stathakis, D., (2018) “A Cost-Effective Method for Tranquility Mapping Using Open Environmental Data”, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, **47** (3), 417–436.
- Patias, P., Mallinis, G., Tsioukas, V., Georgiadis, C., Kaimaris, D., Tassopoulou, M., Verde, N., Dohr, M., Riffler, M., (2020) “Earth Observations as a Tool for Detecting and Monitoring Potential Environmental Violations and Policy Implementation”, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XLIII-B3-2020**, 1491–1496.
- Pauley, S. M., (2004) “Lighting for the Human Circadian Clock: Recent Research Indicates That Lighting Has Become a Public Health Issue”, *Medical Hypotheses*, **63** (4), 588–596.
- Pawson, S. M., Bader, M. K., (2014) “LED Lighting Increases the Ecological Impact of Light Pollution Irrespective of Color Temperature”, *Ecological Applications*, **24** (7), 1561–1568.
- Peterek, M., Bürklin, T., (2014) “Potentials and Challenges of Polycentric City-Regions: A Case-Study of Frankfurt Rhine-Main”, *Architektura Zeszyt*, **1** (A1).
- Polyzos, S., Tsiotas, D., Minetos, D., (2013a) “Determining the Driving Factors of Commuting: An Empirical Analysis from Greece”, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, **6** (3), 46–55.
- Polyzos, S., Minetos, D., Niavis, S., (2013b) “Driving Factors and Empirical Analysis of Urban Sprawl in Greece”, *Theoretical and Empirical Researches in Urban Management*, **8** (1), 5–29.
- Potter, R. B., Darmame, K., Barham, N., Nortcliff, S., (2009) ““Ever-Growing Amman”, Jordan: Urban Expansion, Social Polarisation and Contemporary Urban Planning Issues”, *Habitat International*, **33** (1), 81–92.
- Poursanidis, D., Chrysoulakis, N., (2017) “Remote Sensing, Natural Hazards and the Contribution of ESA Sentinels Missions”, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **6**, 25–38.
- Pramanik, M. M. A., Stathakis, D., (2016) “Forecasting Urban Sprawl in Dhaka City of Bangladesh”, *Environment and Planning B: Planning and Design*, **43** (4), 756–771.

- Prokopiou, D., Mavridoglou, G., Toanoglou, M., Tselentis, B., (2018) “Tourism Development Of The Cyclades Islands: Economic, Social And Carrying Capacity Assessment And Consequences”, in: SDP 2018. Siena, Italy, 509–521.
- Rabaza, O., Galadí-Enríquez, D., Estrella, A. E., Dols, F. A., (2010) “All-Sky Brightness Monitoring of Light Pollution with Astronomical Methods”, *Journal of Environmental Management*, **91** (6), 1278–1287.
- Remote Sensing, B. C. for, (2003) The NASA Scatterometer Climate Record Pathfinder (SCP). URL: [https://www.scp.byu.edu/data/Quikscat/SIRv2/quev/World\\_regions.htm](https://www.scp.byu.edu/data/Quikscat/SIRv2/quev/World_regions.htm) (visited on 05/21/2020).
- Riegel, K. W., (1973) “Light Pollution: Outdoor Lighting Is a Growing Threat to Astronomy”, *Science*, **179** (4080), 1285–1291.
- Román, M. O., Stokes, E. C., (2015) “Holidays in Lights: Tracking Cultural Patterns in Demand for Energy Services”, *Earth’s Future*, **3** (6), 182–205.
- Román, M. O., Stokes, E. C., Shrestha, R., Wang, Z., Schultz, L., Carlo, E. A. S., Sun, Q., Bell, J., Molthan, A., Kalb, V., Ji, C., Seto, K. C., McClain, S. N., Enenkel, M., (2019) “Satellite-Based Assessment of Electricity Restoration Efforts in Puerto Rico after Hurricane Maria”, *PLOS ONE*, **14** (6). Ed. by J. McFadden, e0218883.
- Román, M. O., Wang, Z., Sun, Q., Kalb, V., Miller, S. D., Molthan, A., Schultz, L., Bell, J., Stokes, E. C., Pandey, B., Seto, K. C., Hall, D., Oda, T., Wolfe, R. E., Lin, G., Golpayegani, N., Devadiga, S., Davidson, C., Sarkar, S., Praderas, C., Schmaltz, J., Boller, R., Stevens, J., Ramos González, O. M., Padilla, E., Alonso, J., Detrés, Y., Armstrong, R., Miranda, I., Conte, Y., Marrero, N., MacManus, K., Esch, T., Masuoka, E. J., (2018) “NASA’s Black Marble Nighttime Lights Product Suite”, *Remote Sensing of Environment*, **210**, 113–143.
- Sanhueza, P. A., Santander, M. P., (2003) “Protecting the Night Sky of Northern Chile: An Environmental and Cultural Heritage”, in: *Light Pollution: The Global View*. Ed. by H. E. Schwarzschild. Vol. 284. Astrophysics and Space Science Library. Dordrecht: Springer Netherlands, 69–84.
- SatPy, (2018) SatPy’s Documentation - SatPy 0.9.1a0.Dev0 Documentation. URL: <https://satpy.readthedocs.io/en/latest/> (visited on 09/08/2018).
- Savin, I., Stathakis, D., Dokukin, P., (2017) “Satellite Based Night Lights Data as an Indicator of General Socio-Economic Development of Regions of Russia”,

- Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **14** (6), 210–221.
- Schaaf, C., Wang, Z., Zhang, X., Strahler, A., (2018) VIIRS/NPP BRDF/Albedo Nadir BRDF-Adjusted Ref Daily L3 Global 1km SIN Grid V001 [Data Set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
- Seaman, C., Hillger, D. W., Kopp, T., Williams, R., Miller, S., Lindsey, D., (2015) Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Imagery Environmental Data Record (EDR) User's Guide. Version 1.3.
- Seitzinger, S. P., Gaffney, O., Brasseur, G., Broadgate, W., Ciais, P., Claussen, M., Erisman, J. W., Kiefer, T., Lancelot, C., Monks, P. S., Smyth, K., Syvitski, J., Uematsu, M., (2015) "International Geosphere–Biosphere Programme and Earth System Science: Three Decades of Co-Evolution", *Anthropocene*, **12**, 3–16.
- Shi, K., Yu, B., Huang, Y., Hu, Y., Yin, B., Chen, Z., Chen, L., Wu, J., (2014) "Evaluating the Ability of NPP-VIIRS Nighttime Light Data to Estimate the Gross Domestic Product and the Electric Power Consumption of China at Multiple Scales: A Comparison with DMSP-OLS Data", *Remote Sensing*, **6** (2), 1705–1724.
- Silva, E., Clarke, K., (2002) "Calibration of the SLEUTH Urban Growth Model for Lisbon and Porto, Portugal", *Computers, Environment and Urban Systems*, **26** (6), 525–552.
- Small, C., Pozzi, F., Elvidge, C., (2005) "Spatial Analysis of Global Urban Extent from DMSP-OLS Night Lights", *Remote Sensing of Environment*, **96** (3-4), 277–291.
- Smith, M. G., (2003) "The IAU's Efforts to Control Light Pollution: Astronomy's Contribution to an International, Multidisciplinary, Environmental Effort", in: *Light Pollution: The Global View*. Ed. by H. E. Schwarz. Vol. 284. Astrophysics and Space Science Library. Dordrecht: Springer Netherlands, 123–133.
- Sreekanth, V., Mahesh, B., Niranjana, K., (2017) "Satellite Remote Sensing of Fine Particulate Air Pollutants over Indian Mega Cities", *Advances in Space Research*, **60** (10), 2268–2276.
- Stamou, A., Patias, P., (2014) "Analyzing the Relationship between Urban Patterns and Land Surface Temperature Using Worldview-2 and Landsat-ETM+", *Journal of Earth Science and Engineering*, **4** (4), 195–202.

- Stathakis, D., (2016a) “Forecasting Urban Expansion Based on Night Lights”, *XXIII ISPRS Congress-The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **XLI-B8**, 1049–1054.
- Stathakis, D., (2016b) “Intercalibration of DMSP/OLS by Parallel Regressions”, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **13** (10), 1420–1424.
- Stathakis, D., (2015) “Deriving Soil Sealing Degree from Nighttime VIIRS Imagery”, in: *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 26–31.
- Stathakis, D. N., Liakos, L., (2020a) “Time Series Formation Based on VIIRS 24h Data”, in: *Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments V*. Ed. by N. Chrysoulakis, T. Erbertseder, Y. Zhang. Online Only, United Kingdom: SPIE, 17.
- Stathakis, D. N., Liakos, L., Chalkias, C., Pafi, M., (2018) “A Photopollution Index Based on Weighted Cumulative Visibility to Night Lights”, in: *Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments III*. Ed. by N. Chrysoulakis, T. Erbertseder, Y. Zhang. Berlin, Germany: SPIE, 3.
- Stathakis, D., Baltas, P., (2018) “Seasonal Population Estimates Based on Night-Time Lights”, *Computers, Environment and Urban Systems*, **68**, 133–141.
- Stathakis, D., Karen, S., Igor, S., (2017) “Predicting Urban Expansion in Moscow Based on Night Lights”, in: *Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments II*. Proc.SPIE. Vol. 10431. Warsaw, Poland.
- Stathakis, D., Liakos, L., (2019a) “Further Adjustment of the Defense Meteorological Satellite Program-Operational Linescan System Using Radar Data”, *Journal of Applied Remote Sensing*, **13** (03), 034507/1–9.
- Stathakis, D., Liakos, L., (2019b) “VIIRS Lunar Radiance Removal by Dark Object Subtraction”, in: *IGARSS 2019 - IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Yokohama, Japan: IEEE, 6380–6383.
- Stathakis, D., Liakos, L., (2020b) “Median Shift Lunar Correction for VIIRS”, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1–5.
- Stathakis, D., Liakos, L., Baltas, P., (2021) “Covid-19 Pandemic Assessment by Night-Lights”, in: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2021*. Brussels, Belgium.

- Stathakis, D., Savin, (2018) “Soil Sealing Detection Based on Globally Available Night-Time Imagery,” in: *Proc. Global Soil Map Conf.*, Moscow, Russia, London, Taylor & Francis Group, 69–73.
- Stathakis, D., Tselios, V., Faraslis, I., (2015) “Urbanization in European Regions Based on Night Lights”, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **2**, 26–34.
- Stevenazzi, S., Masetti, M., Nghiem, S. V., Sorichetta, A., (2015) “Groundwater Vulnerability Maps Derived from a Time-Dependent Method Using Satellite Scatterometer Data”, *Hydrogeology Journal*, **23** (4), 631–647.
- Stokes, E. C., Roman, M. O., Wang, Z., Shrethsa, R. M., Yao, T., Kalb, G., (2019) “Urban Applications of Nasa’s Black Marble Product Suite”, in: *2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. 2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE). Vannes, France: IEEE, 1–4.
- Sudhira, H., Ramachandra, T., Jagadish, K., (2004) “Urban Sprawl: Metrics, Dynamics and Modelling Using GIS”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **5** (1), 29–39.
- Sun, B., Zhang, Y., Zhou, Q., Gao, D., (2020) “Street-Scale Analysis of Population Exposure to Light Pollution Based on Remote Sensing and Mobile Big Data-Shenzhen City as a Case”, *Sensors*, **20** (9), 2728.
- Sutton, P., Roberts, D., Elvidge, C., Baugh, K., (2001) “Census from Heaven: An Estimate of the Global Human Population Using Night-Time Satellite Imagery”, *International Journal of Remote Sensing*, **22** (16), 3061–3076.
- Sutton, P. C., (2003) “A Scale-Adjusted Measure of “Urban Sprawl” Using Nighttime Satellite Imagery”, *Remote Sensing of Environment*, **86** (3), 353–369.
- Sutton, P. C., Elvidge, C., Obremski, T., (2003) “Building and Evaluating Models to Estimate Ambient Population Density”, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **69** (5), 545–553.
- Sutton, P. C., Elvidge, C. D., Ghosh, T., (2007) “Estimation of Gross Domestic Product at Sub-National Scales Using Nighttime Satellite Imagery”, *International Journal of Ecological Economics and Statistics*, **8** (S7), 5–21.
- Takeyama, M., Couclelis, H., (1997) “Map Dynamics: Integrating Cellular Automata and GIS through Geo-Algebra”, *International Journal of Geographical Information Science*, **11** (1), 73–91.

- Tan, M., Li, X., Li, S., Xin, L., Wang, X., Li, Q., Li, W., Li, Y., Xiang, W., (2018) “Modeling Population Density Based on Nighttime Light Images and Land Use Data in China”, *Applied Geography*, **90**, 239–247.
- Terando, A. J., Costanza, J., Belyea, C., Dunn, R. R., McKerrow, A., Collazo, J. A., (2014) “The Southern Megalopolis: Using the Past to Predict the Future of Urban Sprawl in the Southeast U.S”, *PLoS ONE*, **9** (7). Ed. by C. A. Layman, e102261.
- Topouzelis, K., (2008) “Oil Spill Detection by SAR Images: Dark Formation Detection, Feature Extraction and Classification Algorithms”, *Sensors*, **8** (10), 6642–6659.
- Topouzelis, K., Papakonstantinou, A., Garaba, S. P., (2019) “Detection of Floating Plastics from Satellite and Unmanned Aerial Systems (Plastic Litter Project 2018)”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **79**, 175–183.
- Tralli, D. M., Blom, R. G., Zlotnicki, V., Donnellan, A., Evans, D. L., (2005) “Satellite Remote Sensing of Earthquake, Volcano, Flood, Landslide and Coastal Inundation Hazards”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **59** (4), 185–198.
- Triantakoustantis, D., Stathakis, D., (2014) “Cokriging Areal Interpolation for Estimating Economic Activity Using Night-Time Light Satellite Data”, in: *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2014*. Ed. by B. Murgante, S. Misra, A. M. A. C. Rocha, C. Torre, J. G. Rocha, M. I. Falcão, D. Taniar, B. O. Apduhan, O. Gervasi. Red. by D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, A. Kobsa, F. Mattern, J. C. Mitchell, M. Naor, O. Nierstrasz, C. Pandu Rangan, B. Steffen, D. Terzopoulos, D. Tygar, G. Weikum. Vol. 8582. Cham: Springer International Publishing, 243–252.
- Triantakoustantis, D., Stathakis, D., (2015) “Examining Urban Sprawl in Europe Using Spatial Metrics”, *Geocarto International*, **30** (10), 1092–1112.
- Tselios, V., Stathakis, D., (2018) “Exploring Regional and Urban Clusters and Patterns in Europe Using Satellite Observed Lighting”, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 553–568.
- Tselios, V., Stathakis, D., Faraslis, I., (2019) “Concentration of Populations and Economic Activities, Growth and Convergence in Europe Using Satellite-Observed Lighting”, *Geocarto International*, 1–22.

- Tselios, V., Stathakis, D., Faraslis, I., (2020) “Concentration of Populations and Economic Activities, Growth, and Convergence in Europe Using Satellite-Observed Lighting”, *Geocarto International*, **35** (14), 1527–1552.
- Tu, Y., Zhou, H., Lang, W., Chen, T., Li, X., Xu, B., (2020) “A Novel Cross-Sensor Calibration Method to Generate a Consistent Night-Time Lights Time Series Dataset”, *International Journal of Remote Sensing*, **41** (14), 5482–5502.
- Votsi, N.-E. P., Kallimanis, A. S., Pantis, I. D., (2017) “An Environmental Index of Noise and Light Pollution at EU by Spatial Correlation of Quiet and Unlit Areas”, *Environmental Pollution*, **221**, 459–469.
- Wainscoat, R. J., (2003) “Protection of Mauna Kea and Haleakala Observatories from Light Pollution”, in: *Light Pollution: The Global View*. Ed. by H. E. Schwarz. Vol. 284. Astrophysics and Space Science Library. Dordrecht: Springer Netherlands, 111–121.
- Wang, W., Liang, H., Yang, L., Liu, K., Su, H., Li, X., (2017) “Analyzing the Urban Heat Island Using Time Series Land Surface Temperature (LST) Data”, in: *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Fort Worth, TX: IEEE, 5874–5876.
- Wang, Z., Roman, M., Kalb, V., Shrestha, R., Stokes, E., Paynter, I., (2020) “Uncertainties in VIIRS Nighttime Light Time Series Analysis”, in: *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Waikoloa, HI, USA: IEEE, 156–159.
- Witmer, F. D. W., O’Loughlin, J., (2011) “Detecting the Effects of Wars in the Caucasus Regions of Russia and Georgia Using Radiometrically Normalized DMSP-OLS Nighttime Lights Imagery”, *GIScience & Remote Sensing*, **48** (4), 478–500.
- Wolfram, S., (1985) “Twenty Problems in the Theory of Cellular Automata”, *Physica Scripta*, **T9**, 170–183.
- Wu, R., Yang, D., Dong, J., Zhang, L., Xia, F., (2018) “Regional Inequality in China Based on NPP-VIIRS Night-Time Light Imagery”, *Remote Sensing*, **10** (2), 240.
- Yang, X., Wang, N., Chen, A., He, J., Hua, T., Qie, Y., (2020) “Changes in Area and Water Volume of the Aral Sea in the Arid Central Asia over the Period of 1960–2018 and Their Causes”, *CATENA*, **191**, 104566.



- Yi, W., He, B., (2009) “Applying SLEUTH for Simulating Urban Expansion of Beijing”, in: *2009 International Forum on Information Technology and Applications*. 2009 International Forum on Information Technology and Applications (IFITA). Chengdu, China: IEEE, 652–656.
- Zeng, X., Shao, X., Qiu, S., Ma, L., Gao, C., Li, C., (2018) “Stability Monitoring of the VIIRS Day/Night Band over Dome C with a Lunar Irradiance Model and BRDF Correction”, *Remote Sensing*, **10** (2), 189.
- Zhang, G., Guo, X., Li, D., Jiang, B., (2019) “Evaluating the Potential of LJ1-01 Nighttime Light Data for Modeling Socio-Economic Parameters”, *Sensors*, **19** (6), 1465.
- Zhang, Q., Schaaf, C., Seto, K. C., (2013) “The Vegetation Adjusted NTL Urban Index: A New Approach to Reduce Saturation and Increase Variation in Nighttime Luminosity”, *Remote Sensing of Environment*, **129**, 32–41.
- Zhang, Q., Seto, K. C., (2011) “Mapping Urbanization Dynamics at Regional and Global Scales Using Multi-Temporal DMSP/OLS Nighttime Light Data”, *Remote Sensing of Environment*, **115** (9), 2320–2329.
- Zhang, X., Li, P., (2018) “A Temperature and Vegetation Adjusted NTL Urban Index for Urban Area Mapping and Analysis”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **135**, 93–111.
- Zhang, Y., Shen, W., Li, M., Lv, Y., (2020) “Assessing Spatio-Temporal Changes in Forest Cover and Fragmentation under Urban Expansion in Nanjing, Eastern China, from Long-Term Landsat Observations (1987–2017)”, *Applied Geography*, **117**, 102190.
- Zhao, X., Yu, B., Liu, Y., Yao, S., Lian, T., Chen, L., Yang, C., Chen, Z., Wu, J., (2018) “NPP-VIIRS DNB Daily Data in Natural Disaster Assessment: Evidence from Selected Case Studies”, *Remote Sensing*, **10** (10), 1526.
- Zhao, Zhou, Li, Cao, He, Yu, Li, Elvidge, Cheng, Zhou, (2019) “Applications of Satellite Remote Sensing of Nighttime Light Observations: Advances, Challenges, and Perspectives”, *Remote Sensing*, **11** (17), 1971.
- Zheng, Q., Weng, Q., Huang, L., Wang, K., Deng, J., Jiang, R., Ye, Z., Gan, M., (2018) “A New Source of Multi-Spectral High Spatial Resolution Night-Time Light Imagery-JL1-3B”, *Remote Sensing of Environment*, **215**, 300–312.
- Zheng, Y., Shao, G., Tang, L., He, Y., Wang, X., Wang, Y., Wang, H., (2019) “Rapid Assessment of a Typhoon Disaster Based on NPP-VIIRS DNB Daily Data: The Case

- of an Urban Agglomeration along Western Taiwan Straits, China”, *Remote Sensing*, **11** (14), 1709.
- Zhou, Y., Smith, S. J., Zhao, K., Imhoff, M., Thomson, A., Bond-Lamberty, B., Asrar, G. R., Zhang, X., He, C., Elvidge, C. D., (2015) “A Global Map of Urban Extent from Nightlights”, *Environmental Research Letters*, **10** (5), 054011.
- Zhuo, L., Ichinose, T., Zheng, J., Chen, J., Shi, P. J., Li, X., (2009) “Modelling the Population Density of China at the Pixel Level Based on DMSP/OLS Non-Radiance-Calibrated Night-Time Light Images”, *International Journal of Remote Sensing*, **30** (4), 1003–1018.
- Zhuo, L., Zheng, J., Zhang, X., Li, J., Liu, L., (2015) “An Improved Method of Night-Time Light Saturation Reduction Based on EVI”, *International Journal of Remote Sensing*, **36** (16), 4114–4130.
- Ziskin, D., Baugh, K., Hsu, F.-C., Elvidge, C. D., (2010) “Methods Used For the 2006 Radiance Lights”, *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*, **30** (0), 131.